

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**CENTRO DE ESTUDOS DO MAR**  
**DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS**

**ALEX VIEIRA FALKENBERG**

**ESTUDO DA DISPERSÃO, MISTURA E QUALIDADE  
DA ÁGUA DO COMPLEXO ESTUARINO DE  
PARANAGUÁ COM USO DE MODELAGEM  
NUMÉRICA**

**PONTAL DO SUL**

**MARÇO – 2009**

**ALEX VIEIRA FALKENBERG**

**ESTUDO DA DISPERSÃO, MISTURA E QUALIDADE  
DA ÁGUA DO COMPLEXO ESTUARINO DE  
PARANAGUÁ COM USO DE MODELAGEM  
NUMÉRICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do título de Mestre em Oceanografia,  
do Programa de Pós-Graduação em Sistemas  
Costeiros e Oceânicos, Área de Concentração:  
Dinâmica Oceânica e Costeira, do Centro de  
Estudos do Mar, da Unidade de Pontal do Sul,  
da UFPR.

**Orientador:** Prof. Dr. Eduardo Marone

**PONTAL DO SUL**

**MARÇO – 2009**

Falkenberg, Alex Vieira, 1973-  
F192        Estudo da dispersão, mistura e qualidade da água do Complexo  
Estuarino de Paranaguá com uso de modelagem numérica / Alex Vieira  
Falkenberg.

– Pontal do Paraná, 2009.  
137 f.: il. (algumas color.); 29 cm.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Marone.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de  
Ciências da Terra, Centro de Estudos do Mar. Programa de  
Pós-graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

1. Oceanografia física. 2. Modelagem numérica. 3. Transporte  
de sedimento. 4. Paranaguá, Baía de (PR). 5. Dispersão. I. Título.  
II. Eduardo Marone. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.354

## TERMO DE APROVAÇÃO

### “ESTUDO DA DISPERSÃO, MISTURA E QUALIDADE DA ÁGUA DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ COM USO DE MODELAGEM”

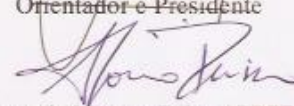
POR

ALEX VIEIRA FALKENBERG

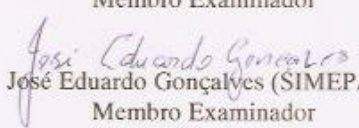
Dissertação nº 031 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre  
no Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos da  
Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos  
professores:



Eduardo Marone (UFPR)  
Orientador e Presidente



Afonso de Moraes Paiva (COPPE)  
Membro Examinador



José Eduardo Gonçalves (SIMEPAR)  
Membro Examinador

Pontal do Paraná, 06 de março de 2009.

Àqueles que partiram e não nos deixaram;  
àqueles que ainda lutam pra ficar um  
pouco mais; àqueles que nos inspiram em  
amor, força e bondade: Helga e Miguel,  
Henrique, Inge e Roseli.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por tudo.

À minha namorada, Jana, pelo amor, carinho, presença, paciência (às vezes impaciência), por me dar forças para superar todos os obstáculos destes dois últimos anos, e por me transformar num “cara de sorte”, ver e me fazer ver as coisas num ponto de vista melhor.

Ao meu orientador, pela oportunidade, incentivo, companheirismo, ensinamentos, apoio, confiança, e por mostrar que sempre existe alguma idéia mirabolante pra resolver qualquer problema.

Ao pessoal do CEM, pela amizade, alunos do PGSISCO, professores, barqueiros e funcionários.

Ao professor Mayerle pela oportunidade de poder assistir as disciplinas do curso de mestrado da Universidade de Kiel/ Corelab, e ao pessoal de Kiel, pela amizade.

Aos professores Carlos Soares e Marcelo Lamour pelos dados de sedimentos.

À Capes, pela bolsa de pesquisa.

*Na paisagem do rio  
difícil é saber  
onde começa o rio;  
onde a lama  
começa do rio;  
onde a terra  
começa da lama;  
onde o homem,  
onde a pele  
começa da lama;  
onde começa o homem  
naquele homem.*

*Difícil é saber  
se aquele homem  
já não está  
mais aquém do homem;  
mais aquém do homem  
ao menos capaz de roer  
os ossos do ofício;  
capaz de sangrar  
na praça;  
capaz de gritar  
se a moenda lhe mastiga o braço;  
capaz  
de ter a vida mastigada  
e não apenas  
dissolvida  
(naquela água macia  
que amolece seus ossos  
como amoleceu as pedras).*

Cão sem plumas (João Cabral de Melo Neto)

## RESUMO

A Baía de Paranaguá possui área superficial de 330 km<sup>2</sup>, volume de água de  $1,8 \times 10^9$  m<sup>3</sup> e profundidade média de 5,4 m, representa o eixo leste-oeste na parte inferior do complexo Estuarino de Paranaguá (48°25'W, 25°30'S).

Com uso do software de modelagem Delft3D para estudo da mistura, dispersão e qualidade da água da Baía de Paranaguá, um modelo hidrodinâmico bidimensional integrado na vertical forçado por constituintes astronômicas foi validado para dados de uma campanha de coleta realizada em setembro de 2007.

O balanço de massas de água foi analisado para períodos de quadratura e sizígia, verificando-se características de retenção de massas de água na sizígia e exportação de massas de água na quadratura. Foram realizadas simulações de salinidade e temperatura para uma primeira calibração, e gerado o mapa de intrusão salina na baía.

Para análise das escalas de tempo relacionadas aos processos de mistura na Baía de Paranaguá foi calculado o prisma de maré ( $2,84 \times 10^8$  m<sup>3</sup>), e com uso dos resultados de modelagem da salinidade foi calculado o tempo de descarga para os períodos de quadratura (107 dias) e sizígia (132 dias). Estes resultados sugerem que as escalas de tempo envolvidas no sistema são dinâmicas, podendo haver alta variabilidade conforme características das forçantes de maré e descarga fluvial.

Com uso do Delft3D-WAQ foram ainda realizadas simulações do tempo de residência médio para 3 dias de sizígia e simulações para o mesmo período de idade da água de elementos traço lançados em pontos particulares na baía (Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço). Através destas análises verificou-se que nestes locais no período da sizígia elementos traço podem se dispersar e se confinar em águas interiores da baía ao invés de serem exportadas para a plataforma continental interna. Foi realizado um teste de um ponto alternativo de lançamento com resultados bem melhores de dispersão e exportação de elementos traço. Testes equivalentes podem ser realizados para diferentes condições de forçantes físicas a fim de minimizar impactos ambientais decorrentes das diversas atividades econômicas atuais e futuras da baía.

Com uso do Delft3D-WAQ foi calibrado um modelo de transporte de material particulado em suspensão para silte e argila, com boas correlações entre valores medidos e simulados. A partir destes resultados, foram criados os mapas de concentração média de silte para um ciclo de maré de sizígia, profundidade de Secchi e os mapas de resuspensão/sedimentação para silte e areia em período de sizígia.

**Palavras-chave:** Baía de Paranaguá, Delft3D, modelagem numérica, dispersão, mistura, transporte de sedimentos, qualidade da água



## ABSTRACT

Paranaguá Bay has surface area of 330 km<sup>2</sup>, water volume of  $1,8 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, average depth of 5,4 m, represents the east-west axis in inner part of the Paranaguá Estuarine Complex (48°25'W, 25°30'S).

The Delft3D modeling package was used to study the mixture, dispersion and water quality of the Paranaguá Bay. A 2DH hydrodynamic model forced with astronomical constituents was validated for measurements realized on September, 2007.

Analyzing water mass balances for neap and spring tide, it was verified retention of water masses in the spring and discharge of water masses in the neap tide. Salinity and temperature simulations for a first calibration had been carried out and the salinity intrusion map was created.

To analyze the temporal scales of the processes related to Paranaguá Bay mixture and dispersion, it was calculated the tidal volume ( $2,84 \times 10^8$  m<sup>3</sup>), and the flushing times for neap tide (107 days) and spring tide (132 days) for the bay.

With the use of Delft3D-WAQ it was simulated the mean local residence time for a period of 3 days of spring tide, and for the same period it was also studied the age of water and the dispersion of conservative tracers released in different areas in the bay (Nhundiaquara River, Guaraqueçaba River, Paranaguá harbor and Ponta do Poço). It was verified for the spring tide that substances released at some specific areas can be confined in inner waters instead of being expelled to the continental shelf. An alternative discharge point was analyzed with much better results of dispersion and exportation of pollutants.

With the use of Delft3D-WAQ a sediment model was calibrated for suspended inorganic matter (silt and sand) and good results were found compared to the measurements. The mean concentration map and the mean Secchi depth for a tidal cycle were presented, as well as resuspension/sedimentation maps for silt and sand for a spring tide period.

**Keywords:** Paranaguá Bay, Delft3D, numerical modeling, sediment transport, mixture, dispersion, water quality,

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Complexo Estuarino de Paranaguá (adaptado de Noernberg, 2001). Os números em vermelho representam: 1 – Baía de Paranaguá, 2 – Baía de Antonina, 3 – Baía de Laranjeiras, 4 – Baía de Pinheiros, 5 – Baía de Guaraqueçaba, 6 – Enseada do Benito, 7 – Enseada de Itaqui.....	9
Fig. 2 – Área de drenagem das baías de Antonina e Paranaguá (linha grossa), até a região da cidade de Paranaguá (seção A). Delimitação das sub-bacias dos rios: (1) Cedro, (2) Faisqueira, (3) Cupiúva, (4) Cachoeira, (5) Venda, (6) Cacatu, (7) Meio, (8) Nunes, (9) Xaxim, (10) Curitibaíba, (11) Moura, (12) São Joãozinho, (13) Sapetanduva, (14) Nhundiaquara, (15) Marumbi, (16) Pinto, (17) Passa Sete, (18) Sagrado, (19) Jacaré e (20) Piedade, (Mantovanelli, 1999).....	13
Fig. 3 – Escalas espaciais para problemas de qualidade da água (em milhas). Adaptado de Lung (1993). ....	27
Fig. 4 – Escalas temporais para problemas de qualidade da água (em segundos). Adaptado de Lung (1993). ....	28
Fig. 5 – Condição de Thatcher-Harleman para concentrações no contorno aberto.	38
Fig. 6 – Etapas básicas para modelagem da qualidade da água com o Delft3D.....	40
Fig. 7 – Identificação dos transectos realizados na campanha de coleta de dados na Baía de Paranaguá em setembro de 2007.....	51
Fig. 8 – Medições de salinidade e temperatura realizadas no transecto longitudinal no dia 10/09/2007 nas estações L1 a L14. ....	53
Fig. 9 – Medições de salinidade e temperatura realizadas na estação B2 (quadratura). O primeiro gráfico apresenta a salinidade, o segundo gráfico representa a temperatura e o último gráfico representa a variação de nível ao longo da coleta de dados.....	54
Fig. 10 – Dados meteorológicos de 1 a 15 de setembro de 2007 da estação meteorológica do CEM. O primeiro gráfico representa a pressão atmosférica, o segundo gráfico representa a precipitação e o último gráfico representa a intensidade e direção dos ventos.....	55
Fig. 11 – Grade numérica do Complexo Estuarino de Paranaguá.....	57
Fig. 12 – Batimetria do Complexo Estuarino de Paranaguá (em metros).....	58
Fig. 13 – Estações de medição de nível para comparação com o modelo.....	60

<b>Fig. 14 – Comparações de nível para diferentes coeficientes de Chèzy no período de sizígia (11/09/2007 a 14/09/2007) para o Porto de Paranaguá. O primeiro gráfico representa as variações de nível simulados para diferentes coeficientes de Chèzy comparados com o nível medido, e o segundo gráfico representa o erro RMSE entre o nível medido e os níveis simulados para diferentes coeficientes de Chèzy.....</b>	<b>61</b>
<b>Fig. 15 – Comparações de corrente no transecto Ilha do Mel – Piaçaguera, período de quadratura. Os gráficos representam a magnitude de corrente (m/s), direção (graus), batimetria do transecto realizado e variação de nível (sinalizada por uma elipse).....</b>	<b>63</b>
<b>Fig. 16 – Comparações de corrente no transecto Pontal – Ilha do Mel, período de sizígia. Os gráficos representam a magnitude de corrente (m/s), direção (graus), batimetria do transecto realizado e variação de nível (sinalizada por uma elipse).....</b>	<b>64</b>
<b>Fig. 17 – Comparações de erros de magnitude de corrente (m/s) e direção de corrente (graus) para diferentes coeficientes de Chèzy no período de sizígia para os transectos Pontal – Ilha do Mel, T1 e T2 do Porto de Paranaguá. O eixo das ordenadas representa os erros RMSE e o eixo das abscissas representa os transectos. O quadro de legenda apresenta os erros médios.....</b>	<b>65</b>
<b>Fig. 18 – Comparação entre nível do Porto de Paranaguá e modelo forçado por constituintes astronômicas com vento na sizígia. O gráfico superior representa as elevações de nível e o gráfico inferior representa o erro entre valores medidos e simulados. A elipse sinaliza a ocorrência de falhas de medições de nível ocorridas no período. ....</b>	<b>66</b>
<b>Fig. 19 – Comparação entre nível do Porto de Paranaguá e modelo forçado por constituintes astronômicas com vento na sizígia. O gráfico superior representa as elevações de nível e o gráfico inferior representa o erro entre valores medidos e simulados.....</b>	<b>67</b>
<b>Fig. 20 – Comparação entre nível do Posto do Tião e modelo forçado por constituintes astronômicas. O gráfico superior representa as elevações de nível e o gráfico inferior representa o erro entre valores medidos e simulados. Os resultados indicam erros locais de batimetria.....</b>	<b>68</b>
<b>Fig. 21 – Mapa de diâmetro médio dos sedimentos da Baía de Paranaguá (mm).....</b>	<b>70</b>
<b>Fig. 22 – Mapa de percentual do total de silte da Baía de Paranaguá.....</b>	<b>70</b>

<b>Fig. 23 – Mapa de percentual do total de areia fina e muito fina da Baía de Paranaguá .....</b>	<b>71</b>
<b>Fig. 24 – Análise de sensibilidade da modelagem de silte para velocidades de sedimentação de 5, 10, 15 e 20 m/d para os pontos L1 e L3 do transecto longitudinal em um período de um dia de simulação. Velocidades de sedimentação menores resultam em valores de concentração de silte mais elevados, bem como tempos maiores de estabilização da concentração.....</b>	<b>74</b>
<b>Fig. 25 – Análise de sensibilidade da modelagem de areia fina/muito fina para velocidades de sedimentação de 250, 350, 450 e 500 m/d para os pontos L4 e L6 do transecto longitudinal em um período de simulação de 18 horas.....</b>	<b>75</b>
<b>Fig. 26 – Velocidade média (cm/s) integrada na vertical das correntes máximas de vazante de sizígia (12/09/2007 23:00).....</b>	<b>77</b>
<b>Fig. 27 – Velocidade média (cm/s) integrada na vertical das correntes máximas de enchente de sizígia (13/09/2007 03:00).....</b>	<b>78</b>
<b>Fig. 28 – Magnitudes de corrente para quadratura (03/09/2007 a 07/09/2007). No gráfico superior em cor azul está representada a magnitude de corrente nos períodos de enchente, e em vermelho a magnitude de corrente para os períodos de vazante. O gráfico inferior representa as variações da elevação de nível. ....</b>	<b>79</b>
<b>Fig. 29 – Seções transversais B2 (Ilha do Mel – Piaçaguera) e B4 (Pontal – Ilha do Mel) que delimitam a área considerada para balanço de massa de água da Baía de Paranaguá .....</b>	<b>80</b>
<b>Fig. 30 – Balanço de massas de água para quadratura, sizígia e os dois períodos conjugados. Os dois gráficos superiores representam as descargas acumuladas referentes aos transectos B2 (azul) e B4 (vermelho) e suas respectivas tendências, bem como a tendência da soma das descargas de B2 e B4 (em verde) para os períodos de quadratura e sizígia. O gráfico inferior representa a soma das descargas acumuladas dos dois transectos (linha tracejada) e a tendência (linha contínua) para quadratura e sizígia conjuntamente.....</b>	<b>81</b>
<b>Fig. 31 – Comparação entre valores medidos e simulados de salinidade e temperatura para sizígia – estação B4. O gráfico superior representa a salinidade simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos), o segundo gráfico representa a temperatura simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos) e o último gráfico representa a variação de nível no período</b>	

considerado. A média do erro percentual absoluto foi de 5% para salinidade e 6% para a temperatura.....	83
<b>Fig. 32 – Comparação entre valores medidos e simulados de salinidade e temperatura para sizígia – estação T1. O gráfico superior representa a salinidade simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos), o segundo gráfico representa a temperatura simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos) e o último gráfico representa a variação de nível no período considerado. A média do erro percentual absoluto foi de 7% para salinidade e 8% para a temperatura.....</b>	<b>84</b>
<b>Fig. 33 – Comparação entre valores medidos e simulados de salinidade e temperatura para sizígia – estação T2. O gráfico superior representa a salinidade simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos), o segundo gráfico representa a temperatura simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos) e o último gráfico representa a variação de nível no período considerado. A média do erro percentual absoluto foi de 5% para salinidade e 7% para a temperatura.....</b>	<b>84</b>
<b>Fig. 34 – Mapa de Salinidade da Baía de Paranaguá – 10 de setembro 13:00 (sizígia) .....</b>	<b>85</b>
<b>Fig. 35 – Região considerada da Baía de Paranaguá para cálculo do prisma de maré.....</b>	<b>86</b>
<b>Fig. 36 – Tempos de descarga para a Baía de Paranaguá. O gráfico superior representa o tempo de descarga (dias) representado em azul para a quadratura, e o nível da estação (m) representado em verde. O gráfico inferior representa o tempo de descarga (dias) representado em azul para a sizígia, e o nível da estação (m) representado em verde.....</b>	<b>89</b>
<b>Fig. 37 – Tempos de residência médio da Baía de Paranaguá (minutos) referente ao período de três dias em sizígia. ....</b>	<b>90</b>
<b>Fig. 38 – Idade de massa de água (dias) a partir de diferentes fontes do CEP (Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço). Os pontos de lançamento estão indicados pelas setas vermelhas.....</b>	<b>92</b>
<b>Fig. 39 – Concentração do traçador conservativo lançado a partir do Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço (mg/l). Os pontos de lançamento estão indicados pelas setas.....</b>	<b>93</b>

Fig. 40 – Concentração do traçador conservativo lançado a partir do Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço (mg/l). As setas indicam o local do lançamento.....	94
Fig. 41 – Simulação de derivadores lançados no início de vazante e início de enchente de maré de sizígia para Porto de Paranaguá, Ponta do Poço, Rio Itiberê e Ilha da Cotinga.....	95
Fig. 42 – Simulação de derivadores lançados no início de vazante e início de enchente de maré de sizígia para Porto de Paranaguá, Ponta do Poço, Rio Itiberê e Ilha da Cotinga.....	97
Fig. 43 – Mapa do coeficiente de Chèzy ( $m^{1/2}/s$ ) ao longo de um ciclo de maré.....	98
Fig. 44 – Percentual de tempo com tensão de cisalhamento de fundo superior à tensão crítica (início de movimento) em um ciclo completo de maré para areia muito fina no período da quadratura.....	100
Fig. 45 – Percentual de tempo com tensão de cisalhamento de fundo superior à tensão crítica (início de movimento) em um ciclo completo de maré para areia fina no período da sizígia. ....	101
Fig. 46 – Simulação de transporte de areia fina/muito fina com uso do processo CALSAND após uma semana de sizígia. Altura de areia em mm. ....	102
Fig. 47 – Correlação entre MPS inorgânico e transmitância para o ponto B4 – sizígia.....	103
Fig. 48 – Simulação de MPS inorgânico para o ponto B4 – sizígia. ....	105
Fig. 49 – Simulação de MPS inorgânico para o ponto T1 – sizígia.....	106
Fig. 50 – Simulação de MPS inorgânico para o ponto T2 – sizígia.....	106
Fig. 51 – Mapa de concentração média de silte na Baía de Paranaguá em um ciclo de maré de sizígia.....	107
Fig. 52 – Mapa de profundidade Secchi média silte na Baía de Paranaguá em um ciclo de maré de sizígia (m).....	108
Fig. 53 – Mapa das principais regiões de resuspensão e sedimentação de silte em um período de sizígia. ....	109
Fig. 54 – Mapa das principais regiões de resuspensão e sedimentação de areia em um período de três dias de sizígia.....	110
Fig. 55 – Dispersão da pluma de sólidos dissolvidos fixos provenientes de esgotos domésticos (mg/l). Os pontos de lançamento estão indicados pelas setas....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Problemas de qualidade da água em estuários, adaptado de Lung (1993). .....	3
Tabela 2 – Dados fisiográficos da Baía de Paranaguá comparados com a Baía de Laranjeiras (adaptado de Knoppers <i>et al</i> , 1987 e Marone <i>et al</i> , 2005). ....	10
Tabela 3 – Características físicas das seções superior, mediana e inferior da Baía de Paranaguá, (Marone <i>et al.</i> , 2005). ....	11
Tabela 4 – Características de maré para os dados de nível observados para a Baía de Paranaguá. As diferenças de fase estão em minutos, considerando a Galheta como zero de origem, (Marone <i>et al.</i> , 1997). ....	15
Tabela 5 – Valores médios das correntes que atravessam transversalmente as seções superior, mediana e inferior da Baía de Paranaguá, (Marone <i>et al.</i> , 2005). ....	16
Tabela 6 – Escala de tamanho do sedimento. ....	41
Tabela 7 – Programação das medições realizadas na campanha da Baía de Paranaguá de setembro de 2007. ....	52
Tabela 8 – Dados de vazões (em m <sup>3</sup> /s) dos rios utilizados no modelo. ....	56
Tabela 9 – Parâmetros do modelo hidrodinâmico. ....	59
Tabela 10 – Comparação entre simulações de nível para diferentes coeficientes de Chèzy. ....	61
Tabela 11 – Comparação de nível entre simulações com e sem campos de vento. ....	68
Tabela 12 – Parâmetros de análise de sensibilidade na modelagem de material particulado em suspensão. ....	73
Tabela 13 – Constituintes astronômicas do contorno aberto esquerdo. ....	136
Tabela 14 – Constituintes astronômicas do contorno aberto central. ....	136
Tabela 15 – Constituintes astronômicas do contorno aberto direito. ....	137

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	- Acoustic Doppler Current Profiler
ANA	- Agência Nacional de Águas
APPA	- Administração dos Portos de Paranaguá em Antonina
C	- Carbono
CEM	- Centro de Estudos do Mar
CEP	- Complexo Estuarino de Paranaguá
CTCost	- Câmara Técnica de Integração da Gestão das Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos da Zona Costeira
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DIP	- Fósforo Inorgânico Dissolvido
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
GFM	- Grupo de Física Marinha
MA	- Millennium Ecosystem Assessment
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
MPS	- Material Particulado em Suspensão
N	- Nitrogênio
OD	- Oxigênio Dissolvido
P	- Fósforo
PLCT	- Process Library Configuration Toolbox
POM	- Princeton Ocean Model
RAMS	- Regional Atmospheric Modeling System
RMSE	- Root mean square error (raiz quadrada do erro médio quadrático)
SQA	- Secretaria da Qualidade Ambiental
SRH	- Secretaria de Recursos Hídricos
Sudersha	- Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento
UFPR	- Universidade Federal do Paraná



## LISTA DE SÍMBOLOS

$Cr$	Número de Courant	adimensional
$\Delta t$	Passo de tempo em segundos	s
$\{\Delta x, \Delta y\}$	Espaçamento mínimo de grade na direção x ou y em metros	m
$g$	Aceleração da gravidade	$m.s^{-2}$
$H$	Profundidade total da coluna de água	m
$u, v, w$	Componentes de velocidade integradas por camadas nas direções das três coordenadas x,y,z	$m.s^{-1}$
$t$	Tempo	s
$X, Y, Z$	Forças de corpo nas direções x,y,z	$m.s^{-2}$
$\rho$	Densidade do fluido	$kg.m^{-3}$
$P$	Pressão do fluido	$N.m^{-1}$
$\nu$	Coeficiente de viscosidade cinemática	$m^2.s^{-1}$
$\overline{ru'u'},$ $\overline{ru'v'},$ $\overline{ru'w'}$	Componentes das tensões de Reynolds na direção x nos planos x, y,z	N/m
$\overline{ru'v'},$ $\overline{rv'v'},$ $\overline{rv'w'}$	Componentes das tensões de Reynolds na direção y nos planos x, y,z	N/m
$j$	Latitude no local de interesse ( $j = \sim 25^\circ$ para Baía de Paranaguá)	graus
$\omega$	Módulo do vetor velocidade angular de rotação da Terra ( $\omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$ )	$rad.s^{-1}$
$z$	Elevação da superfície da água acima (positivo) ou abaixo (negativo) do nível de referência	m
$P_a$	Pressão atmosférica	$N.m^{-1}$
$\epsilon$	Coeficiente cinemático turbulento de viscosidade	$m^2.s^{-1}$
$\bar{Y}$	Concentração média no tempo do soluto	$mg.l^{-1}$
$Y'$	Flutuações turbulentas da concentração do soluto	$mg.l^{-1}$
$Y_0$	Fonte ou sorvedouro do soluto	$mg.l^{-1}s^{-1}$
$Y_d$	Decaimento ou taxa de crescimento do soluto	$mg.l^{-1}s^{-1}$

$y_k$	Taxa de transformação cinética total do soluto	$\text{mg.l}^{-1}\text{s}^{-1}$
$D_{tx}$	Coeficientes de difusão turbulenta nas direções x, y e z.	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$D_{ty} \quad D_{tz}$		
$M_i^t$	Massa no início do passo de tempo	kg
$M_i^{t+\Delta t}$	Massa no fim do passo de tempo	kg
$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr}$	Variações de massa decorrente de transporte	$\text{kg.s}^{-1}$
$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_P$	Variações de massa decorrente de processos biogeoquímicos	$\text{kg.s}^{-1}$
$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_S$	Variações de massa devido à existência de fontes ou sorvedouros	$\text{kg.s}^{-1}$
$T_{x_0}^A$	Transporte advectivo em $x=x_0$	$\text{g.s}^{-1}$
$v_{x_0}$	Velocidade em $x=x_0$	$\text{m.s}^{-1}$
$A$	Área da superfície em $x=x_0$	$\text{m}^2$
$C_{x_0}$	Concentração em $x=x_0$	$\text{g.m}^{-3}$
$T_{x_0}^D$	Transporte dispersivo em $x=x_0$	$\text{g.s}^{-1}$
$D_{x_0}$	Coeficiente de dispersão em $x=x_0$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$\left.\frac{\partial C_{x_0}}{\partial x}\right _{x=x_0}$	Gradiente de concentração em $x=x_0$	$\text{g.m}^{-4}$
$D_x$	Coeficiente de dispersão na direção x	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$D_y$	Coeficiente de dispersão na direção y	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$D_z$	Coeficiente de dispersão na direção z	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$V_x$	Velocidade na direção x	$\text{m.s}^{-1}$
$V_y$	Velocidade na direção y	$\text{m.s}^{-1}$
$V_z$	Velocidade na direção z	$\text{m.s}^{-1}$
$S$	Fontes de descarga	$\text{g.m}^{-3}\text{s}^{-1}$
$f_R$	Termos de reação de processos em função da concentração e do tempo	$\text{g.m}^{-3}\text{s}^{-1}$
$t_0$	Tempo em que o fluxo de saída inverte para fluxo de entrada	s
$t$	Tempo após $t_0$	s
$C$	Concentração do contorno aberto simulada	$\text{mg.l}^{-1}$

$C_B$	Concentração de contorno aberto definida pelo usuário	mg.l <sup>-1</sup>
$T$	Espaço de tempo de Thatcher-Harleman	s
$f_{AREIA}$	Transporte de sedimento não coesivo	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
$fc_{AREIA}$	Coeficiente empírico (valor típico = 0.05)	adimensional
$u_*$	Velocidade de cisalhamento de fundo	m.s <sup>-1</sup>
$d_{50}$	Diâmetro médio da partícula	m
$r_{areia}$	Densidade do sedimento	kg.m <sup>-3</sup>
$r_{fluido}$	Densidade do fluido	kg.m <sup>-3</sup>
$u$	Velocidade instantânea	m.s <sup>-1</sup>
$z_b$	Nível da camada de fundo	m
$q$	Porosidade da camada de fundo	adimensional
$f_{sed}$	Fluxo de sedimentação do material em suspensão	gm <sup>2</sup> .d <sup>-1</sup>
$P_{sed}$	Probabilidade de sedimentação	adimensional
$Z_{sed}$	Taxa de sedimentação de ordem zero	gm <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
$V_{sed}$	Velocidade de queda do material em suspensão	m.d <sup>-1</sup>
$c$	Concentração do material em suspensão	g.m <sup>-3</sup>
$t$	Tensão de cisalhamento de fundo	N.m <sup>-2</sup>
$t_{sed}^{cr}$	Tensão crítica de cisalhamento de fundo para sedimentação	N.m <sup>-2</sup>
$f_{res}$	Fluxo de resuspensão de matéria inorgânica;	g.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
$P_{res}$	Probabilidade de resuspensão da camada de fundo de Partheniades <0,∞>	adimensional
$Z_{res}$	Fluxo de resuspensão de ordem zero	g.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
$V_{res}$	Taxa de resuspensão de primeira ordem	d <sup>-1</sup>
$MI$	Quantidade de sedimento no fundo (matéria inorgânica)	g.
$t$	Tensão de cisalhamento de fundo	N.m <sup>-2</sup>
$t_{res}^{cr}$	Tensão crítica de cisalhamento de fundo para resuspensão	N.m <sup>-2</sup>
$A$	Área do segmento (ou célula)	m <sup>2</sup>
$t$	Tensão de cisalhamento de fundo total	N.m <sup>-2</sup>
$t_{fluxo}$	Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de fluxos hidrodinâmicos	N.m <sup>-2</sup>
$t_w$	Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de ondas de superfície	N.m <sup>-2</sup>
$t_{ship}$	Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de	N.m <sup>-2</sup>

	movimentação de embarcações	
$C_{2D}$	Coeficiente de Chèzy bidimensional	$m^{1/2}.s^{-1}$
$\bar{u}$	Velocidade horizontal média ao longo da coluna de água	$m.s^{-1}$
$u_*$	Velocidade de atrito de fundo	$m.s^{-1}$
$n$	Coeficiente de Manning (valor típico 0.02)	$m^{-1/2}.s$
$k_S$	Rugosidade geométrica equivalente de Nikuradse (valores típicos entre 0.15 e 0.01 m)	m
$med$	Valor medido	[unidade]
$sim$	Valor simulado	[unidade]
M	Massa de sedimento no fundo	kg
Surf	Área da superfície do segmento	$m^2$
h	Altura da camada de sedimento no fundo	m
$r$	Densidade do sedimento ( $r = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$ )	$kg.m^{-3}$
Perc	Percentual do sedimento no fundo	%
$t_{desc}$	Tempo de descarga	h
$V_f$	Volume total de água doce acumulada no estuário	$m^3$
$Q_f$	Vazão de entrada de água doce	$m^3.h^{-1}$
$f$	Fração de água doce em um volume de água estuarino	%
$S_o$	Salinidade da água do mar no exterior do estuário	g/kg
$S$	Salinidade do volume de água considerado	g/kg
$dV$	Elemento de volume	$m^3$
$T_{res}$	Tempo de residência da célula computacional	s
$Vol$	Volume da célula computacional	$m^3$
$Q$	Vazão de água nas fronteiras	$m^3.s^{-1}$
$Age_{tr}$	Idade do traçador	dias
$Cd_{tr}$	Concentração do traçador simulado como não conservativo	$g.m^{-3}$
$Cc_{tr}$	Concentração do traçador simulado como conservativo	$g.m^{-3}$

$Td_{tr}$	Taxa de decaimento de primeira ordem do traçador não conservativo	$d^{-1}$
$Surf$	Área da superfície do segmento ou célula	$m^2$
$D_*$	Parâmetro da partícula	adimensional
$q_{cr}$	Parâmetro crítico de Shields	adimensional
$s$	Densidade relativa	adimensional
$r_s$	Densidade da partícula	$kg.m^{-3}$
$r_w$	Densidade do fluido	$kg.m^{-3}$
$d_{50}$	Diâmetro médio da partícula	$m$
$u$	Coefficiente cinemático de viscosidade	$m^2.s^{-1}$
$Q_d$	Vazão média de esgoto doméstico	$l/s$
$Pop$	População da cidade (habitantes)	hab
$QPC$	Quota per capita de água	$l/hab.d$
$R$	Coefficiente de retorno esgoto/água	adimensional

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	O caminho da poluição	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	5
1.4	Estrutura do trabalho	7
2	Área de estudo	8
2.1	Aspectos Geomorfológicos	10
2.2	Aspectos físico-químicos	12
2.2.1	Drenagem fluvial	12
2.2.2	Regime de marés e ondas	14
2.2.3	Temperatura e salinidade	17
2.2.4	Classificação	18
2.2.5	Clima	19
2.2.6	Propriedades químicas	20
2.3	Aspectos Humanos	22
3	Aspectos de modelagem	25
3.1	Formulação de modelagem hidrodinâmica	29
3.2	Formulação de modelagem de qualidade da água	33
3.3	Modelagem de qualidade da água com Delft3D-WAQ	38
3.4	Aspectos teóricos do Material Particulado em Suspensão	40
3.4.1	Sedimentos coesivos	42
3.4.2	Sedimentos não coesivos	42
3.5	Modelagem do Transporte de sedimentos não coesivos	43
3.6	Modelagem do material particulado em suspensão	44
3.6.1	Processo de sedimentação do MPS	44
3.6.2	Processo de resuspensão do material particulado	45
3.6.3	Tensão de cisalhamento de fundo total	46
3.7	Estudos de modelagem previamente realizados	47
4	Materiais e métodos	50

4.1	Dados	50
4.1.1	Campanha de coleta de dados	50
4.1.2	Dados meteorológicos	54
4.1.3	Dados de maré	55
4.1.4	Dados de descarga de rios	55
4.1.5	Dados batimétricos e grade numérica	56
4.2	Validação do modelo hidrodinâmico com Delft3D-FLOW	58
4.2.1	Comparações de nível	60
4.2.2	Comparações de corrente	62
4.2.3	Campos de vento	65
4.3	Aspectos numéricos do Delft3D-WAQ	69
4.4	Modelagem de sedimentos	69
4.4.1	Material particulado em suspensão	71
5	Resultados	77
5.1	Hidrodinâmica	77
5.2	Salinidade e Temperatura	82
5.3	Escalas de tempo envolvidas nos processos de mistura	86
5.3.1	Prisma de maré da Baía de Paranaguá	86
5.3.2	Tempo de descarga da Baía de Paranaguá	87
5.3.3	Tempo de residência	89
5.3.4	Idade de uma massa de água	90
5.4	Derivadores	94
5.5	Sedimentos	98
5.5.1	Coeficiente de Chèzy	98
5.5.2	Transporte de fundo de sedimentos não coesivos	99
5.5.3	Material particulado em suspensão	102
5.6	Dispersão da pluma esgotos domésticos de Paranaguá	110
6	Conclusões e trabalhos futuros	113
6.1	Conclusões	113
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	115
	Referências	118
	APÊNDICE A – Formulação da modelagem hidrodinâmica no Delft3d-FLOW	125
	APÊNDICE B – Tensão de cisalhamento de fundo para modelos tridimensionais	131
	APÊNDICE C – Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de ondas de superfície	133
	ANEXO A – Tabelas de constituintes astronômicas	136

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O caminho da poluição

A água, devido às suas propriedades de solvente e a capacidade de transportar partículas, incorpora a si diversas impurezas as quais definem a sua qualidade, resultante de fenômenos naturais e da atuação do homem. O estudo da dispersão e mistura das propriedades da água é fundamental, tanto para se caracterizar as conseqüências de uma determinada atividade poluidora, quanto para se estabelecer os meios para que se satisfaçam os parâmetros de qualidade da água de acordo com seu uso (Von Sperling, 1996).

Através do transporte de resíduos pelos rios e ventos, a poluição terrestre se estendeu para os oceanos, atualmente representando cerca de 77% do total da poluição marinha (M.A., 2005). Diferindo das emissões atmosféricas que são normalmente diluídas e difusas, as emissões diretas partem geralmente de fontes específicas, podendo ter tempos de permanência prolongados em águas relativamente fechadas por estruturas geográficas ou hidrográficas, como no caso dos estuários.

Perante a ameaça da poluição, merece especial atenção a região costeira, onde a destruição de alguns habitat trouxe graves conseqüências, de forma que algumas comunidades que durante gerações dependeram do mar, não só perderam sua fonte de subsistência, mas também o sentido de suas vidas. Estes fatos tornam cada vez mais necessário pensar de forma sistêmica e buscar formas de integração entre oceanos e bacias hidrográficas (Comissão Nacional Independente sobre os Oceanos, 1999).

Regiões de transição entre o continente e os oceanos, os estuários caracterizam-se por apresentar elevada complexidade biológica e grande fragilidade em relação a atividades antropogênicas. Em uma forma mais clássica, Miranda *et al.* (2002) definem os estuários como:

*“Corpos de água parcialmente fechados, com aberturas para o oceano adjacente, onde a água do mar é diluída pela água de origem fluvial. Essa diluição é ocasionada pela mistura da água fluvial com a água do mar”.*

O termo mistura se aplica ao conjunto de processos físicos que tendem a promover homogeneidade da concentração de propriedades conservativas e não conservativas. Há dois processos que contribuem para a mistura: a advecção e a difusão. Na advecção os movimentos ocorrem regularmente e em grande escala, envolvendo transporte de massa ou volume, enquanto que, na difusão ocorrem movimentos irregulares em pequena escala (difusão turbulenta) associados a movimentos de difusão molecular, tais que as



variações locais das propriedades não resultam em transporte de massa ou volume. Nos processos de mistura estuarina e oceânica, a difusão turbulenta é varias ordens de grandeza superior à difusão molecular (Miranda, 2007).

O termo difusão é também utilizado como sinônimo de mistura, embora em seu sentido estrito a difusão (turbulenta e molecular) é equivalente à mistura somente quando não há variação espacial da velocidade média do fluido. Quando o processo envolve o espalhamento de partículas ou de substâncias que não se misturam com a água, este processo é mais apropriadamente descrito como dispersão, embora muitos pesquisadores utilizem o termo dispersão como sinônimo de mistura (Miranda, 2007).

Quando um poluente é introduzido no estuário também há ocorrência de mistura e, em qualquer um dos casos, esse fenômeno se dá pela combinação de movimentos de natureza macroscópica (correntes) e de pequena escala (difusão turbulenta) (Miranda *et al.*, 2002).

No meio ambiente, pelo fato dos estuários serem áreas de grandes variações naturais, sua fauna e flora são selecionadas e restritas em sua variedade pela necessidade de suportar estas condições de variabilidade. Por esta razão, a capacidade do ecossistema estuarino em aceitar poluentes, tais como matéria orgânica é relativamente alta. Os limites desta aceitação do meio ambiente devem ser determinados a fim de se alcançar um melhor equilíbrio entre desenvolvimento industrial e conservação da amenidade ambiental (McLusky, 1981).

Quanto à importância ecossistêmica, os estuários apresentam funções vitais por constituírem o habitat natural de aves, peixes, mamíferos e outros organismos, por ser o ambiente de desova e criação de muitas comunidades biológicas e por desempenharem importante papel nas rotas migratórias de peixes de valor comercial (Ketchum, 1983). Embora representem menos de 20% da área terrestre total, mais de 45% da população mundial vive nas regiões costeiras, que provêem importantes benefícios sociais, recursos naturais e econômicos (Crossland *et al.* 2005), os hoje chamados “serviços” dos ecossistemas. O contínuo aumento populacional alavanca o incremento das diversas atividades econômicas e seus respectivos impactos ambientais associados na qualidade da água dos estuários, a citar o aumento dos despejos industriais e domésticos, aumento do número de portos e da carga de produtos comercializados, aumento de atividades agrícolas e pesqueiras, atividades de turismo, entre outras. A tabela 1 apresenta alguns problemas de qualidade da água em estuários.

**Tabela 1 – Problemas de qualidade da água em estuários, adaptado de Lung (1993).**

<b>Constituintes</b>	<b>Impactos na qualidade da água</b>
Salinidade	Alteração do regime de salinidade local através de diluição ou diminuição desta implicando na alteração do hábitat de organismos estuarinos
Sólidos suspensos	Alteração do hábitat de organismos bênticos Podem servir como transportadores de contaminantes Redução da penetração da luz e conseqüentemente, limitação da fotossíntese
Vírus e bactérias	Provenientes de despejos agrícolas e efluentes domésticos e industriais, estes organismos podem contaminar organismos estuarinos.
Oxigênio dissolvido	Necessário para grande parte dos organismos aquáticos, a variação de oxigênio dissolvido pode exterminar ou deslocar comunidades estuarinas
Nutrientes	Grandes despejos de nutrientes podem estimular a superprodução de alguns tipos de algas Blooms periódicos de fitoplâncton podem causar amplas variações de níveis de oxigênio dissolvido e depleção em regiões bênticas e de maior profundidade
Substancias tóxicas	Alta concentração de amônia, metais, substâncias orgânicas sintéticas, e outros poluentes, podem alterar ou matar organismos aquáticos Uma alta toxicidade pode ser causada pela exposição a poluentes específicos por pequenos períodos de tempo

## 1.2 Justificativa

Estuários representam um habitat intermediário entre mar e continente, sujeitos a múltiplas forçantes físicas, biogeoquímicas e antropogênicas, resultando em um ambiente de complexa e dinâmica mistura de condições de transição quase nunca estáticas, que os torna susceptíveis a diversas alterações nas múltiplas escalas temporais e espaciais em uma dinâmica extremamente complexa.

Neste ambiente dinâmico, fatores físicos e químicos apresentam importantes variações que impõem severas dificuldades no planejamento e gerenciamento das atividades na busca da sustentabilidade destes ecossistemas. Muitos destes fatores estão intimamente relacionados com padrões de distribuição salina, magnitude de correntes, variação da maré, energia de ondas e deposição de sedimentos, bem como distribuição de temperatura, oxigênio e concentração de nutrientes. A distribuição de metais traço, tais como ferro, manganês, cobalto, níquel, cobre, zinco e cádmio em estuários são controlados principalmente pela distribuição e transporte de materiais

particulados em suspensão, principalmente a posição da zona de máxima turbidez, (McLusky, 1981).

Um dos grandes desafios da atualidade é compatibilizar o uso dos recursos naturais com preservação ambiental em direção à sustentabilidade. A viabilidade da gestão integrada dos recursos hídricos proporcionar o uso múltiplo das águas depende de ferramentas, tais como banco de dados e modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água, que podem ser aplicados em um sistema de suporte à decisão.

Os modelos de qualidade de água permitem auxiliar no entendimento do comportamento do sistema hídrico, identificar a influência das várias fontes de poluição sobre os diversos parâmetros de qualidade da água, bem como seus impactos, avaliar o estabelecimento ou crescimento de uma determinada atividade econômica, estudar a influência de descargas de esgotos industriais ou domésticos no corpo de água e indicar um ponto ótimo de despejo, entre outros, servindo de importante ferramenta de apoio a gestores de recursos hídricos na tomada de decisões. Pereira *et al.* (2004) consultam diversos autores e enumeram justificativas para o uso de modelos de qualidade da água na gestão de recursos hídricos, tais como:

- Suporte à decisão entre alternativas de gestão ou uso dos recursos naturais;
- Auxílio no entendimento do destino e transporte de substâncias químicas através da quantificação de suas reações, evolução e movimentos;
- Estimativa das concentrações de exposição química em organismos aquáticos e/ou humanos no passado, presente ou futuro;
- Complementação de informações em análises de fluxos de diferentes sistemas e estudo de processos ambientais.

No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) por intermédio da Secretaria da Qualidade Ambiental (SQA) e da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), juntamente com a Agência Nacional de Águas (ANA), dada à importância e necessidade da integração entre gestão costeira e gestão de recursos hídricos, criaram em 2001 a Câmara Técnica de Integração da Gestão das Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos da Zona Costeira (CTCost). Em documento básico de subsídio à discussão de gerenciamento integrado de 2001, o MMA ressalta a necessidade do uso de modelos de qualidade da água na avaliação de qualidade de águas superficiais, (MMA, 2000):

*“Os estudos deverão ser elaborados prioritariamente a partir do levantamento das informações e dados existentes, relativos aos constituintes físico-químicos e biológicos, contemplando a consistência, o tratamento e a interpretação dos dados, incluindo a utilização de modelos matemáticos de qualidade das águas”.*

A lei nº 9.433, de janeiro de 1997, que Institui a política Nacional de Recursos Hídricos tem como um dos instrumentos o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo usos preponderantes da água. A resolução nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes com base na vazão do corpo hídrico, ou vazão de referência, para os casos de águas doces. O artigo 10 §4º desta resolução dispõe que para o caso de águas salinas ou salobras, em que não é aplicável a vazão de referência, deverão ser elaborados estudos específicos sobre a dispersão e assimilação de poluentes no meio hídrico para estabelecer os valores máximos permitidos para os parâmetros químicos em cada classe de enquadramento. O artigo 33 desta resolução dispõe que o órgão ambiental competente a autorizar despejo na zona de mistura de efluentes poderá autorizar, conforme tipo de substância, valores em desacordo com os estabelecidos para a classe de enquadramento correspondente, desde que não comprometa os usos previstos para o corpo de água.

Recentes estudos atentam para o aspecto do potencial de mistura de efluentes despejados em pontos particulares de bacias hidrográficas, rios ou estuários. Cada ponto pode ter características diferenciadas de escoamento que afetam diretamente o potencial de mistura do constituinte e conseqüentemente, a qualidade da água. Os regimes de escoamento que estão compreendidos entre os regimes laminar e turbulento são denominados advecção caótica, cujas propriedades induzem maior potencial de dispersão de poluentes. Novikov *et al.* (2006), utilizam um modelo hidrodinâmico de duas dimensões para o sistema estuarino do rio Lower Hudson (EUA) e comparam os potenciais de mistura de dois pontos de descarga de efluentes, um deles apresentando características de advecção caótica. Este tipo de estudo pode ser bastante importante na escolha dos pontos ótimos de despejos de efluentes com grandes conseqüências na qualidade da água do corpo receptor.

### 1.3 Objetivos

Este estudo é parte de um projeto denominado “Desenvolvimento de Estratégias Sustentáveis para Portos Brasileiros” resultante do acordo de cooperação técnico-científica entre os Governos do Brasil e da Alemanha, coordenado por pesquisadores do Grupo de Física Marinha (GFM) do Centro de Estudos do Mar (CEM), da Universidade Federal do Paraná e do Corelab (Research and Technology Center Westcoast), Universidade de Kiel.

Este projeto visa o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para o gerenciamento sustentável dos portos brasileiros, com estudos de caso nos Portos de Paranaguá (PR) e Rio Grande (RS), através da aplicação de ferramentas de modelagem

numérica e tecnologia da informação para conduzir pesquisa e prover alternativas de gerenciamento de problemas de erosão e assoreamento, impactos ambientais, riscos resultantes de operações portuárias e atividades de dragagem (Mayerle, 2008).

Os objetivos principais do projeto são:

- Avaliar as características hidrodinâmicas, o transporte de sedimentos e a distribuição e as fontes de poluentes da Baía de Paranaguá;
- Desenvolver, calibrar e validar modelos numéricos hidrodinâmicos, de transporte de sedimentos, morfodinâmicos e de qualidade da água para a Baía de Paranaguá;
- Identificar com base nas simulações realizadas, estratégias para o gerenciamento sustentável da dragagem, atividades de despejos e poluição.

Estudos numéricos de dispersão e mistura aplicados ao Complexo Estuarino de Paranaguá constituem importante ferramenta para gestão de recursos hídricos, permitindo estabelecer o destino e quantificar a concentração de elementos traço, conforme hidrodinâmica local do ponto de despejo e carga poluidora, com vistas de indicar pontos ótimos de despejos para minimizar impactos ambientais e viabilizar o uso múltiplo das águas.

Como ferramenta de modelagem numérica será utilizada o Delft3D desenvolvido pela WL Delft Hydraulics, um software completamente integrado composto por diversos módulos para modelagem numérica em diversos ambientes aquáticos, tais como oceanos, plataforma continental, águas costeiras, estuários e rios. É possível realizar simulações hidrodinâmicas, de transporte de sedimentos, ondas, evoluções morfológicas, qualidade da água e ecologia.

No presente estudo buscou-se entender os fenômenos de dispersão e mistura de propriedades da água para a Baía de Paranaguá aplicando o software Delft3D e seus diferentes módulos como ferramenta para alcançar os objetivos específicos citados a seguir. Deve ser notado que, os objetivos específicos estão sujeitos à qualidade e quantidade de dados ambientais a serem coletados no projeto.

1. Avaliar a distribuição do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá;
2. Fazer uma primeira tentativa, se possível, através de dados de qualidade da água na baía de Paranaguá em pontos específicos, de identificação das principais fontes de poluição e inferir sobre a localização ótima destes pontos de lançamento

a fim de minimizar impactos ambientais capazes de prejudicar outras atividades dependentes de qualidade da água na baía;

3. Disponibilizar ferramentas para elaboração de projetos de licenciamento ambiental a fim de determinar as exigências de despejos e atividades localizadas na Baía de Paranaguá;
4. Analisar o potencial transporte de substâncias tóxicas via adsorção pelo material particulado em suspensão;
5. Analisar a potencial filtração da luz em decorrência da turbidez e sua limitação à fotossíntese;
6. Identificar e quantificar as principais regiões de erosão e deposição de sedimentos;

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

O capítulo 2 apresenta a descrição da Baía de Paranaguá baseada em trabalhos de diversos pesquisadores e aborda os aspectos geomorfológicos, físico-químicos e humanos. A descrição do sistema é de vital importância para indicar a escolha do tipo de modelo numérico a ser utilizado, tal que seja capaz de explicar os fenômenos descritos.

No capítulo 3 estão descritas as bases teóricas dos processos envolvidos, bem como as formulações utilizadas pelo modelo. Ao final são citados alguns trabalhos desenvolvidos em modelagem para a Baía de Paranaguá e outras aplicações interessantes.

No capítulo 4 estão identificados os dados utilizados e a descrição da metodologia empregada para a validação do modelo hidrodinâmico que serve de base para a modelagem de processos de qualidade da água bem como a descrição dos parâmetros de calibração envolvidos nestes processos.

No capítulo 5 estão descritos os resultados obtidos nas modelagens hidrodinâmica e de qualidade da água.

O capítulo 6 finaliza o trabalho com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

O complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) situa-se no Estado do Paraná, no sudeste do Brasil (48°25'W, 25°30'S), é parte de um extenso sistema estuarino subtropical interconectado que inclui o sistema de Cananéia-Iguape localizado na parte sul da costa do Estado de São Paulo. O Complexo Estuarino de Paranaguá (612 Km<sup>2</sup>) é composto por dois corpos de água principais, as baías de Paranaguá e Antonina (260 Km<sup>2</sup>) e as baías de Laranjeiras e Pinheiros (200 Km<sup>2</sup>), (Lana *et al.*, 2001).

O CEP se conecta ao mar aberto através de três canais de maré, além de uma quarta conexão artificial, sendo as duas principais conexões os canais que estão ao redor da Ilha do Mel (152 Km<sup>2</sup>). Estes canais apresentam dois caminhos principais de circulação separados por um grande baixio denominado Baixo do Perigo, limitando os sistemas estuarinos da Baía de Paranaguá e da Baía de Laranjeiras, (Angulo, 1999). A terceira conexão com a costa é o canal de Superagüi, um canal independente na porção central-norte da Baía de Laranjeiras, e a quarta conexão localiza-se na barra do Ararapira via Canal do Varadouro (canal artificial).

O CEP possui uma grande diversidade de ambientes incluindo planícies de maré, baixios, costões rochosos, marismas, canais de maré e manguezais, cujo funcionamento é hidrodinamicamente influenciado pela circulação, forçada pelas marés, e pela descarga de água doce (Mantovanelli, 1999).

A Baía de Paranaguá representa o eixo leste-oeste na parte inferior do Complexo Estuarino de Paranaguá, e a Baía de Laranjeiras (eixo sul-norte), no setor mais ao Norte. A figura 1 representa o Complexo estuarino de Paranaguá e identifica as baías, sub-estuários, rios e localidades referenciadas no trabalho, conforme a seguinte legenda:

1. Baía de Paranaguá
2. Baía de Antonina
3. Baía de Laranjeiras
4. Baía de Pinheiros
5. Baía de Guaraqueçaba
6. Enseada do Benito
7. Enseada de Itaquí

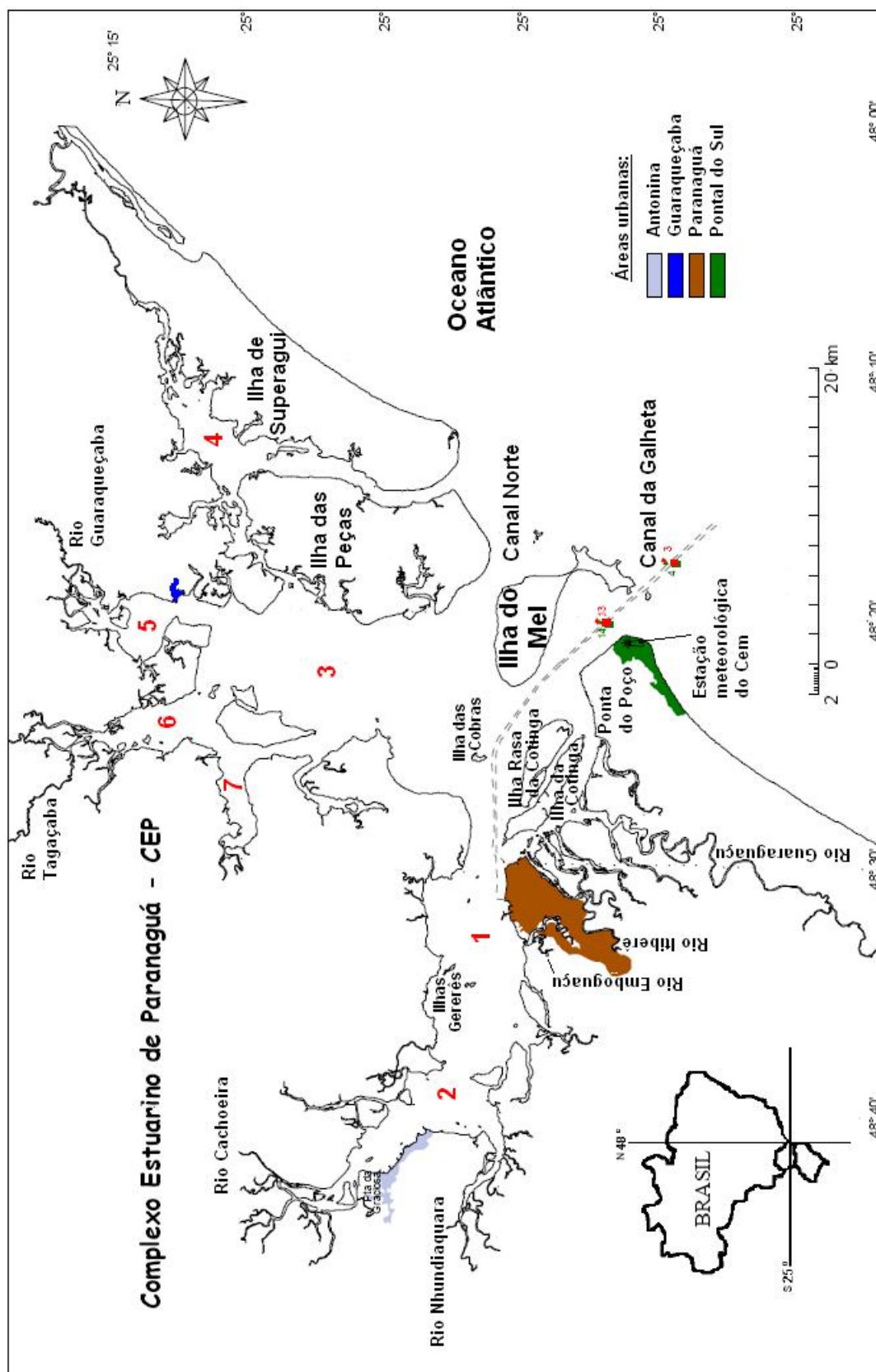


Fig. 1 – Complexo Estuarino de Paranaguá (adaptado de Noernberg, 2001). Os números em vermelho representam: 1 – Baía de Paranaguá, 2 – Baía de Antonina, 3 – Baía de Laranjeiras, 4 – Baía de Pinheiros, 5 – Baía de Guaraqueçaba, 6 – Enseada do Benito, 7 – Enseada de Itaquí.



Os dados fisiográficos estimados por planimetria de cartas náuticas (DHN-30, marinha brasileira) e cartas geológicas (Departamento de Geologia, UFPR) apresentados na tabela 2 apresentam uma comparação entre a Baía de Paranaguá e a Baía de Laranjeiras (Knoppers *et al.*, 1987):

**Tabela 2 – Dados fisiográficos da Baía de Paranaguá comparados com a Baía de Laranjeiras (adaptado de Knoppers *et al.*, 1987 e Marone *et al.*, 2005).**

Local	Área (Km <sup>2</sup> )	Volume (10 <sup>6</sup> x m <sup>3</sup> )	Profundidade média (m)	Profundidade máxima (m)
Baía de Paranaguá	330	1804	5,4	33
Baía de Laranjeiras	200	500	2,5	27

A Baía de Paranaguá propriamente dita possui área superficial de 330 km<sup>2</sup> e um volume de água de  $1.8 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, profundidade média de 5.4 m e profundidade máxima de 33 m. O prisma de maré é de aprox.  $0.58 \times 10^9$  m<sup>3</sup> com intrusão de aproximadamente 7.7 km e tempo de residência aproximado de 3 dias (com variações que acompanham as mudanças de maré e sazonais), (Marone *et al.*, 2005).

## 2.1 Aspectos Geomorfológicos

As duas regressões que sucederam após as ocorrências de máximas elevações de nível criaram duas zonas geomorfológicas distintas: uma zona superior (oeste de Paranaguá) que constitui um paleo-vale inundado, estreito e cortado; e uma zona inferior (leste de Paranaguá) caracterizada por largas praias de planícies costeiras (Lessa e Angulo, 1995).

A Ilha do Mel, localizada na boca da baía é parte de uma fragmentada praia de planície costeira, que juntamente com dois deltas de maré de vazante protegem o interior da Baía de Paranaguá das condições de ondas de alta energia (Lessa *et al.*, 1998).

Associados aos dois canais de entrada principais da Baía de Paranaguá ocorrem deltas de maré. No canal de entrada norte é possível identificar um delta tipo maré vazante com lobo frontal e um canal principal com bifurcação. As formas associadas ao canal de entrada sul da Baía de Paranaguá formam o mais extenso delta de maré da costa do Estado do Paraná. Ao sul do canal principal (artificial na atualidade) existe um complexo de barras conhecido como Banco da Galheta, com dunas submersas que se movimentam costa afora pelo efeito das correntes de maré vazante. Estas barras desenvolvem-se de forma rápida por receberem sedimentos transportados pela deriva

litorânea (sentido sul-norte), que são barrados pelas correntes de maré do canal principal, (Angulo, 1999).

Considerando as características morfológicas e sedimentares, o sistema estuarino da Baía de Paranaguá pode ser dividido em três zonas (Lessa *et al.*, 1998):

**Zona da boca do estuário (inferior)** à localizada na parte mais baixa do estuário, onde o canal principal é mais profundo que 10 metros (profundidade máxima de 35 metros em frente à Ponta do Poço). Esta zona é rodeada por praias de planície costeira e os sedimentos de fundo são caracterizados por areias finas a muito finas bem selecionadas, com as areias finas (<0.062 mm) variando de 0% na parte final da boca até 40% (parte final no sentido do interior da baía);

**Zona de funil estuarino (mediana)** à estende-se de Paranaguá a Antonina, representando a parte mais larga do complexo estuarino, com profundidades máximas em torno de 10 a 15 metros em frente ao Porto de Paranaguá, mas geralmente variando de 10 a 4 metros, decrescendo no sentido interno à baía. O fundo é caracterizado por uma mistura de lama e areia, esta última representando menos de 50% do total. A zona de funil apresenta um afunilamento gradual em direção ao interior, evidenciando um estuário hipersíncrono;

**Zona de meandramento (superior)** à corresponde aos últimos 5 km do complexo estuarino, representando a parte mais estreita, com canais rasos, com profundidades inferiores a 4 metros, onde ocorre grande influência fluvial. Os sedimentos de fundo variam de pouco selecionados a areias médias, com menos de 40% finos e com ocorrência de grãos maiores que 2 mm. As ilhas existentes localizam-se na saída de vários pequenos rios, possivelmente representando deltas de rios.

As características físicas da Baía de Paranaguá estão representadas na tabela 3.

**Tabela 3 – Características físicas das seções superior, mediana e inferior da Baía de Paranaguá, (Marone *et al.*, 2005).**

Setor	Área da seção (10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	Área (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	Profundidade média (m)	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Runoff (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /d) Chuvoso / seca	Descarga de maré (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Prisma de maré (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
<b>Superior</b>	9	50	1.9	95	10 / 3	5331	119
<b>Mediana</b>	50	93	4.3	400	7 / 2	7885	176
<b>Inferior</b>	130	187	7.0	1309	4 / 1	12724	284

Existem vários sinais recentes de assoreamento do CEP, com um maior afluxo de sedimentos fluviais e sua deposição na cabeceira do sistema. Nos últimos 30 anos as barras de maré têm aumentado, provavelmente devido à construção de uma usina hidrelétrica no Rio Cachoeira (Lessa *et al.*, 1998).

## **2.2 Aspectos físico-químicos**

### **2.2.1 Drenagem fluvial**

Com base em dados de 20 anos, Bigarella (1978) estimou a descarga fluvial média anual dos principais rios tributários na Baía de Paranaguá como sendo de  $44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Knoppers *et al.*, (1987), considerando dados de 30 anos provenientes de fontes diversas de precipitação anual média corrigida pela evaporação da bacia de drenagem e superfície da baía e relacionando as vazões dos rios com relação à precipitação, a descarga total de água doce na baía foi estimada em  $75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Embora nenhum estudo sobre a influência das águas subterrâneas na baía tenha sido executado, segundo (Marone *et al.*, 1997), esta fonte pode ser bem representativa em relação à descarga total, possivelmente em torno de 10% da descarga superficial. Os mesmos autores, com base na diluição salina e na densidade de rios, afirmam que a descarga de água doce total deve estar subestimada, podendo superar os  $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

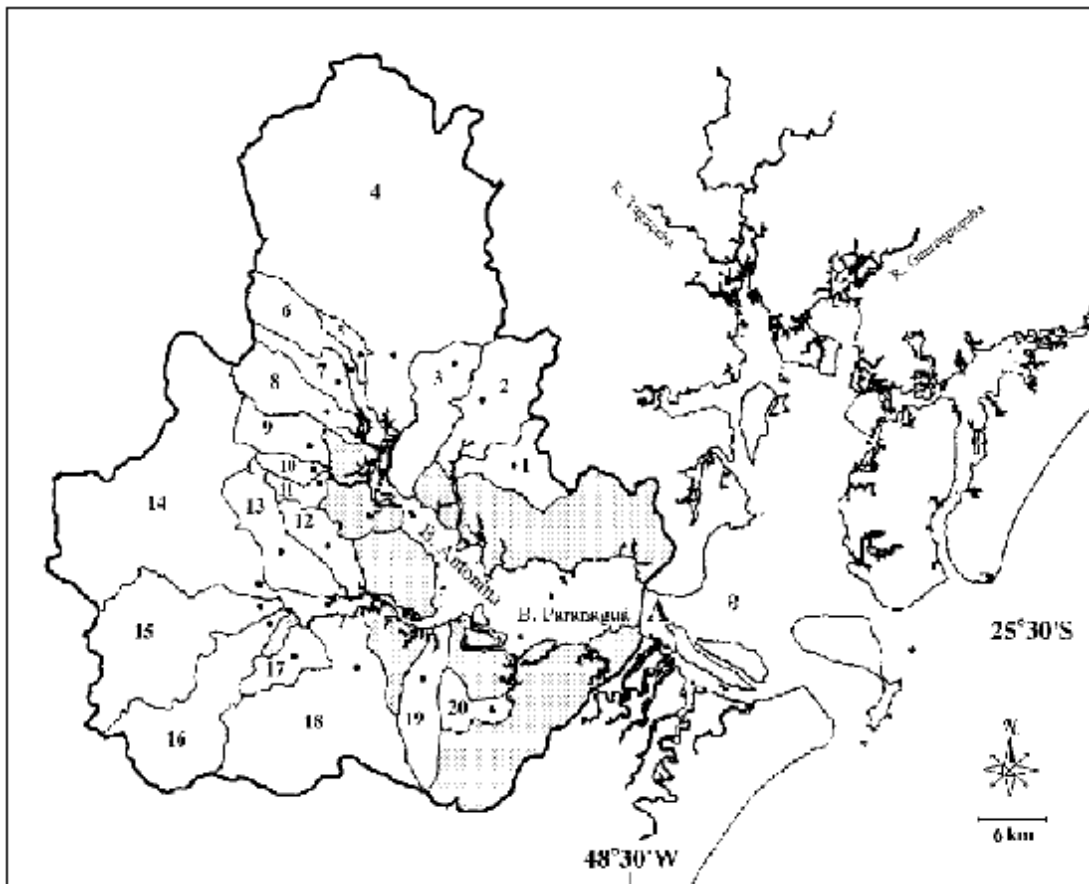
O CEP recebe a drenagem de aproximadamente 70% da área da bacia hidrográfica litorânea do estado do Paraná (Bacia Atlântica). Especificamente para as baías de Antonina e Paranaguá é drenado o aporte de água doce de uma área de  $2188 \text{ km}^2$ , equivalente a 54% da área de drenagem do complexo. A razão entre a área da bacia de drenagem e a área do corpo estuarino que recebe o aporte da água doce corresponde a 0,18 para as baías de Laranjeiras e Pinheiros e a 0,12 para as baías de Antonina e Paranaguá, indicando que estas últimas sofrem uma maior influência do aporte de água doce continental (Mantovanelli, 1999).

Na região da Baía de Paranaguá podem ser identificadas duas principais sub-bacias hidrográficas: a sub-bacia da Baía de Antonina, que desemboca no eixo N-NW na cabeceira da Baía de Antonina, com o Rio Cachoeira como principal, e a sub-bacia do Nhundiaquara, que deságua no eixo S-SW da Baía de Antonina, onde se destaca o Rio Nhundiaquara. Esta área de drenagem engloba os municípios de Antonina, Morretes e Paranaguá (Bigarella *et al.*, 1978; Mantovanelli, 1999).

Os rios destas sub-bacias nascem nas encostas da Serra do Mar, em altitudes entre 100 e 1.900 m, com cotas da nascente superiores a 1.000 m para os principais rios. Constituem cursos perenes em função da elevada e regular precipitação da região, da frequente condensação de umidade atmosférica que se infiltra no solo e da umidade

permanente do manto de intemperismo que abastece o lençol freático (Bigarella *et al.*, 1978).

Mantovanelli (1999) caracterizou a dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão (MPS) nas bacias de Paranaguá e Antonina nas estações seca e chuvosa. Neste estudo, Mantovanelli verificou baixa correlação linear entre chuva e vazão para o período estudado, demonstrando a dependência da variação espacial e temporal da precipitação e a complexidade dos processos envolvidos. A figura 2 representa a área de drenagem da Baía de Paranaguá e as respectivas sub-bacias, elaborada por Mantovanelli.



**Fig. 2 – Área de drenagem das baías de Antonina e Paranaguá (linha grossa), até a região da cidade de Paranaguá (seção A). Delimitação das sub-bacias dos rios: (1) Cedro, (2) Faisqueira, (3) Cupiúva, (4) Cachoeira, (5) Venda, (6) Cacatu, (7) Meio, (8) Nunes, (9) Xaxim, (10) Curitibaíba, (11) Moura, (12) São Joãozinho, (13) Sapetanduva, (14) Nhundiaquara, (15) Marumbi, (16) Pinto, (17) Passa Sete, (18) Sagrado, (19) Jacaré e (20) Piedade, (Mantovanelli, 1999).**

Mantovanelli (1999) verificou que especialmente durante o inverno, o Rio Cachoeira constitui o principal aporte de águas e material particulado em suspensão para a Baía de Paranaguá. No período de inverno estudado, as vazões do Rio Cachoeira ( $25.34 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e Rio Nhundiaquara ( $2.36 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) somadas contribuíram com cerca de 82% do total. No verão, a contribuição dos demais rios se eleva, com destaque para os rios Nhundiaquara ( $34.95 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e Marumbi ( $12.46 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), que juntamente com o Rio Cachoeira ( $46.85 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), contribuíram para o período estudado, com cerca de 66% da vazão medida total desses rios.

O eixo Leste-Oeste do CEP (Baía de Paranaguá), com uma maior relação comprimento/largura e uma área de mangue de  $112.8 \text{ km}^2$  ( $75,9 \text{ km}^2$  na margem Sul e  $36,9 \text{ km}^2$  na margem Norte), sofre maior influência da bacia de drenagem, apresentando resposta mais rápida e intensa aos processos relacionados ao aporte de água doce, como a intrusão salina, entrada de sedimentos fluviais, processos de mistura e formação da zona de máxima turbidez. No eixo Sul-Norte (Baías de Laranjeiras e Pinheiros), a relação comprimento/largura e a profundidade média são menores, o uso e ocupação do solo são diferenciados, e a área de mangue é maior, totalizando  $133,6 \text{ km}^2$  ( $57,4 \text{ km}^2$  na margem oeste e  $76,2 \text{ km}^2$  na margem leste), quando considerados os sub-estuários. Devido à presença destes sub-estuários, tais como as baías de Itaquí, Benito, Guaraqueçaba e Pinheiros, a influência da bacia de drenagem não é tão direta quanto no eixo Leste-Oeste, (Noernberg, 2001).

### 2.2.2 Regime de marés e ondas

O regime de marés é caracterizado por uma desigualdade diurna com padrão semi-diurno na presença de amplitudes de marés máximas (sizígia). O atraso na ocorrência das marés alta e baixa aumenta progressivamente conforme se caminha estuário adentro, (Knoppers *et al.*, 1987).

Na ausência de efeitos meteorológicos significativos, a circulação estuarina no complexo estuarino da baía de Paranaguá é dominada principalmente pela forçante de maré, sendo a M2 (lunar semi-diurno), a principal componente de maré, (Marone *et al.*, 1997).

A variação de maré aumenta estuário acima, especialmente durante marés de sizígia, variando de 1.7m na boca até aproximadamente 2.7m em Antonina, tabela 4.

**Tabela 4 – Características de maré para os dados de nível observados para a Baía de Paranaguá. As diferenças de fase estão em minutos, considerando a Galheta como zero de origem, (Marone et al., 1997).**

Local	Diferenças de fase na Sizígia (min)		Diferenças de fase na Quadratura (min)		Período de vazante (horas)	Período de enchente (horas)	Variação de sizígia (metros)	Variação de quadratura (metros)
	Alta	Baixa	Alta	Baixa				
<b>Galheta</b>	-	-	-	-	6.8	5.5	1.74	1.30
<b>Cobras</b>	69	55	91	75	-	-	2.07	1.68
<b>Paranaguá</b>	88	68	106	93	7.5	4.8	2.09	1.70
<b>Antonina</b>	100	110	132	151	8.1	4.2	2.74	2.02

Nas marés de quadratura a variação da maré é reduzida a menos de 80% dos valores de maré de sizígia, e fortes interações não lineares entre as componentes de maré permitem a formação de até seis eventos diários de maré alta e baixa (Marone et al., 1994a).

Existe um grande número de componentes de maré de águas rasas, aumentando da boca para o interior da baía. Estes componentes não astronômicos são gerados por fortes interações não lineares decorrentes da advecção e fricção no interior da baía. Uma importante evidência das interações não lineares pode ser observada pela amplificação da variação dos harmônicos de alta frequência. Se a M2 é amplificada 1,59 vezes de Galheta até Antonina, os componentes não lineares de mais alta frequência, tais como MS4, são amplificados em 2,5 vezes ou mais, (Marone et al., 1997).

As marés também demonstram uma assimetria crescente no sentido do interior da baía, caracterizada por um curto período descendente e um longo período ascendente de maré. A razão média entre os períodos de vazante e de enchente aumenta de 1,23 no canal da Galheta para 1,92 próximo a Antonina. As marés alta e baixa em Antonina ocorrem com até 1,5 horas de atraso em relação à ocorrência no canal da Galheta, (Marone et al., 1997).

Embora as distâncias entre Galheta e Cobras e as distâncias entre Paranaguá e Antonina sejam praticamente equivalentes, Marone et al. (1997) observam que a diferença de fase entre Galheta e Cobras é maior que entre Paranaguá e Antonina para a componente M2 e demais componentes semidiurnos e quaterdiurnos. Os autores sugerem que os componentes ímpares, sobretudo os componentes diurnos, propagam principalmente como ondas estacionárias ao longo de toda baía, enquanto que os componentes pares demonstram um padrão de ondas progressivas na boca da baía,

evoluindo para um padrão misto na seção mediana e tornando-se um padrão de ondas estacionárias na porção interior.

As correntes de vazante são, em média, 10 a 15 % superiores às de enchente. Isto ocorre devido à influência dos atritos lateral e de fundo, gradativamente maiores em direção à cabeceira (CAMARGO, 1998) e, também, devido ao aporte de água doce e à circulação residual (MARONE *et al.*, 1995). As correntes residuais de maré (modo barotrópico) podem ser significativamente modificadas pelo vento, tanto na zona costeira como no interior da baía (CAMARGO, 1998).

O efeito do vento é particularmente importante na geração de marés meteorológicas, geralmente associadas à passagem de sistemas frontais do quadrante S-SSE (frentes frias). Podem ocorrer elevações do nível do mar na Baía de Paranaguá decorrentes de efeitos meteorológicos, como o caso observado por Marone *et al.* (1994b) no período entre 15 e 20 de agosto de 1993: em maré de sizígia, quando a associação da passagem de uma frente fria sobre o oceano e um centro de alta pressão sobre o continente ocasionou no dia 18 de agosto um aumento anormal do nível do mar no Porto de Paranaguá, atingindo 3.5m, ou seja, cerca de 80 cm acima da preamar prevista. Considerando-se o aumento de 80 cm acima do nível do mar nesta data em relação à área de drenagem de 600 km<sup>2</sup>, chega-se a um volume excedente de  $4,8 \times 10^8$  m<sup>3</sup> de água, represados somente na Baía de Paranaguá.

A tabela 5 indica valores médios de correntes de massas de água que atravessam transversalmente as principais seções da baía. O fato de todos os valores serem positivos indica exportação de água em todas as seções, (Marone *et al.*, 2005).

**Tabela 5 – Valores médios das correntes que atravessam transversalmente as seções superior, mediana e inferior da Baía de Paranaguá, (Marone *et al.*, 2005).**

Setores	Corrente média no período chuvoso (m/s)	Corrente média no período de seca (m/s)
Superior para mediana	0.18	0.37
Mediana para inferior	0.29	0.33
Inferior para a costa	0.30	0.34

As correntes máximas observadas foram de 1.1 m s<sup>-1</sup> na vazante e de 0.85 m s<sup>-1</sup> na enchente, (Marone *et al.*, 1997. Knoppers *et al.*, (1987) verificaram a ocorrência de um padrão de circulação lateral não homogêneo na seção mediana da baía, indicando uma velocidade maior no flanco sul desta seção, provavelmente em decorrência da maior presença de rios ao sul da Baía de Paranaguá, (Knoppers *et al.*, 1987).

A região de Antonina se torna hidrodinamicamente complicada em decorrência da presença de bancos de areia e planícies de maré, com extensas áreas sendo expostas em marés baixas, (Marone *et al.*, 1997).

A ação das ondas, principalmente do sudeste, é significativa apenas na região da boca do estuário, porém ventos de leste podem gerar ondas de superfícies locais. A altura média destas ondas na boca é de 0.5 metros, com período de 3 a 7 segundos, porém ondas podem atingir alturas máximas de 2 a 3 metros em tempestades (Marone *et al.*, 1994a).

### 2.2.3 Temperatura e salinidade

Knoppers *et al.* (1987) identificam a presença de variação sazonal de salinidade na Baía de Paranaguá, com valores superficiais de salinidade menores no verão devido a maiores valores de descarga fluvial, e valores mais altos no inverno em decorrência de valores de descarga fluvial reduzidos, com possibilidades de variações intra-anuais em decorrência da variabilidade irregular sazonal da precipitação.

Em geral, o gradiente vertical de salinidade aumenta estuário adentro e o gradiente horizontal de salinidade diminui em direção à boca do sistema estuarino. Condições próximas de homogêneas são encontradas na parte inferior do sistema estuarino nos períodos de máximas forçantes de maré e descarga fluvial abaixo de  $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Na seção mediana da baía, quando ocorre descarga fluvial acima de  $90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , observa-se um gradiente vertical de salinidade de  $8 \text{ g/kg}$ , (Knoppers *et al.*, 1987).

O sistema estuarino mostra uma importação de sal durante os períodos de seca e uma exportação equivalente durante os períodos de chuva. O gradiente horizontal de salinidade média varia de 12 a  $29 \text{ g/kg}$  no verão e 20 a  $34 \text{ g/kg}$  no inverno, com gradientes máximos de 0 a  $35 \text{ g/kg}$  no verão e de 3 a  $35 \text{ g/kg}$  no inverno. A temperatura média da água varia de  $23$  a  $30^\circ\text{C}$  no verão e de  $18$  a  $25^\circ\text{C}$  no inverno, (Marone *et al.*, 1997).

Noernberg (2001) estudou a variação espaço-temporal de propriedades físico-químicas simultaneamente na Baía de Paranaguá (eixo Leste-Oeste) e na Baía de Laranjeiras e Pinheiros (eixo Sul-Norte) em um período de 26 meses. Verificou-se que a região de Antonina apresenta rápida resposta a elevados valores de precipitação, ocorrendo, nestes casos, valores de salinidade próximos a zero e elevado aporte de sedimentos em suspensão. Através de correlação de dados de temperatura, salinidade e precipitação, verificou-se que a variação da salinidade do corpo aquoso, tanto no eixo Leste-Oeste como no eixo Sul-Norte, não está relacionada à precipitação total mensal, e



sim à precipitação dos sete dias anteriores à medição, sendo que a temperatura apresentou marcada sazonalidade e pouca variação entre os dois eixos.

Noernberg (2001) compara situações extremas em duas campanhas, uma em maré de quadratura e alta precipitação nos dias precedentes e outra em maré de sizígia sem precipitação. No evento de quadratura verifica-se variação longitudinal de salinidade de 1,2 g/kg na superfície da região de Antonina a 31,5 g/kg no fundo na extremidade Leste. Observou-se uma faixa de acentuada estratificação (entre 5 e 20 km de distancia da desembocadura), chegando ao valor máximo do gradiente vertical a 8,4 g/kg. Na campanha de maré sizígia e sem precipitação observou-se salinidade de 5,8 g/kg na superfície da região de Antonina a 27,9 g/kg no fundo na extremidade Leste, com praticamente nenhuma estratificação entre as camadas de superfície e fundo ao longo de todo o eixo. A baixa variação de temperatura nas duas campanhas e a alta correlação entre salinidade e densidade evidencia que os processos baroclínicos que ocorrem na baía têm maior influência da salinidade que da temperatura. Observou-se também que a temperatura média da água nos dois eixos apresenta acentuada sazonalidade e alto coeficiente de correlação com a variação da temperatura do ar média mensal.

#### 2.2.4 Classificação

O diagrama de estratificação-circulação de Hansen&Hattray relaciona os parâmetros de estratificação e circulação. O parâmetro de estratificação é determinado pela razão adimensional  $dS / \bar{S}$ , onde  $dS = S_f - S_s$  é a diferença entre os valores estacionários das salinidades de fundo e de superfície e  $\bar{S}$  é o valor estacionário da salinidade média na coluna de água. Convencionou-se o valor limite para o parâmetro de estratificação de  $10^{-1}$  para estabelecer a transição entre estuários fracamente estratificados (tipo a) e altamente estratificados (tipo b).

O parâmetro de circulação é determinado pela razão  $u_s / u_f$ , onde  $u_s$  é o valor da corrente residual na superfície e  $u_f$ , a descarga fluvial. O valor 1.5 para o parâmetro de circulação indica que o transporte de sal é gerado apenas por difusão turbulenta. Segundo o diagrama os estuários podem ser classificados nos seguintes tipos (Miranda et al., 2002):

- Tipo 1 – Bem misturados – o fluxo residual é estuário abaixo em todas as profundidades, e o transporte de sal estuário acima é devido somente ao processo de difusão turbulenta;

- Tipo 2 – Parcialmente misturados – o fluxo resultante reverte com a profundidade e ambos os processos advectivo e dispersivo são importantes para contribuir com o transporte de sal estuário acima.
- Tipo 3 – O transporte de sal estuário acima ocorre quase que exclusivamente por transporte advectivo, característicos dos fiordes.

Tipo 4 – Estuários tipo cunha salina, altamente estratificados.

Segundo medições realizadas na seção mediana da baía durante um ciclo completo de maré, conforme diagrama de estratificação-circulação de Hansen&Hattray, esta região foi classificada como um estuário parcialmente misturado do tipo 2a, verificando-se fluxo reverso no fundo decorrente do efeito baroclínico, (Knoppers *et al.*, 1987).

Mantovanelli (1997) analisou uma seção da Baía de Paranaguá e verificou que no verão, em todos os ciclos de maré, tanto em sizígia como em quadratura, a Baía de Paranaguá apresentou apreciável estratificação (tipo 2b). Nos ciclos de quadratura de inverno, a classificação da baía situou-se próxima à região de transição entre os tipos 2b e 2a-3a, enquanto que nos ciclos de sizígia de inverno apresentou fraca estratificação.

Mantovanelli (1997) também analisou a estratificação lateral de salinidade da Baía de Paranaguá, verificando valores máximos de estratificação lateral nos ciclos de maré de verão, com gradientes entre 1 e 1.6 g/kg e valores reduzidos para o inverno na faixa de 0.3 a 0.9 g/kg.

## 2.2.5 Clima

De acordo com a classificação de Köppen, o clima na planície costeira e na Serra do Mar até 700 metros acima do nível do mar, é do tipo Cfa, subtropical úmido mesotérmico com verões quentes. Na planície costeira as temperaturas médias anuais encontram-se entre 20.8 °C e 22 °C, caindo até 13.1 °C nas partes mais elevadas, (Angulo, 1999), com uma média anual de chuvas de 2500 mm, (máximo de 3500 mm) com cerca de 85% de umidade média do ar, (Lana *et al.*, 2001).

As chuvas que caem no litoral paranaense são dos tipos ciclônico, orográfico e de convecção. As estações mais chuvosas são o verão com 37,2% das precipitações e o outono com 29,7%, enquanto no inverno, 13,8% e primavera, 19,2%, (Angulo, 1993).

A dinâmica dos ventos no litoral paranaense é definida principalmente pelo Anticiclone do Atlântico Sul e pelo Anticiclone Migratório Polar, na sua ação sobre o Ramo Atlântico da Massa Polar. Verifica-se que os ventos mais fortes representam 16% dos totais, sendo que os com velocidades acima de 6 m/s (velocidade do vento a 10 m de

altura necessária para iniciar o transporte no solo de areia com diâmetro de 1,75Ø) são provenientes principalmente do sul e leste. Os ventos de maior magnitude, acima de 8 m/s, 10 m/s e 12 m/s, são provenientes principalmente do sul-sudeste em detrimento a leste, e sul (Angulo, 1999).

### **2.2.6 Propriedades químicas**

A distribuição e variação temporal das propriedades físico-químicas da Baía de Paranaguá estão bem relacionadas com os gradientes de salinidade e de energia, (Lana *et al.*, 2001). Este fato é de fundamental importância neste trabalho, visto que a correta seleção de um elemento traço ou vetor (como os sedimentos, por exemplo) podem indicar através da modelagem hidrodinâmica, o destino de outros poluentes, principalmente conservativos.

#### **2.2.6.1 Oxigênio dissolvido (OD)**

A concentração anual de OD varia tipicamente de 4 a 7,5 ml/l. As concentrações mais baixas são normalmente encontradas nas águas de fundo das regiões internas e medianas nos períodos chuvosos, enquanto que o aumento de produção primária pode causar valores máximos de saturação na região mediana da Baía (Brandini, 1985a).

#### **2.2.6.2 Material em suspensão**

Segundo Lana *et al.* (2001), as concentrações médias variam de 10 a 120 mg/l em verões chuvosos, e cerca de 40% menores durante invernos secos, possivelmente devido à resuspensão de sedimentos pelo vento e intrusão salina das águas de fundo.

Noernberg (2001) salienta que existem basicamente três fatores que causam picos na concentração de material particulado em suspensão (MPS) na superfície da água: o grande aporte de material oriundo da bacia de drenagem em decorrência de alta precipitação (ocorre nas proximidades de Antonina), a formação da zona de máxima turbidez (ocorre preferencialmente entre as Ilhas Gererês e o Porto de Paranaguá), e a penetração de água com características marinhas nas regiões mais próximas à desembocadura (ocorre na região circunvizinha à Ilha do Mel, próximo à desembocadura do CEP).

Através de medições realizadas em uma seção transversal à Baía de Paranaguá em frente ao Porto de Paranaguá, Mantonvanelli (1999) verificou em análise de perfis estacionários de material particulado em suspensão presença de estratificação vertical com menores valores na superfície e concentrações mais elevadas no fundo. Observou diferenças pequenas entre MPS de fundo e superfície durante as quadraturas, e diferenças maiores durante as marés de sizígia, com aumento das concentrações junto

ao fundo devido às correntes mais fortes, gerando uma maior estratificação vertical líquida.

#### **2.2.6.3 Substâncias húmicas**

O maior aporte de substâncias húmicas no CEP está associado a períodos mais quentes, à maré baixa e à maior influência da bacia de drenagem, Os Rios Itiberê, dos Correias, dos Almeidas, Embogüaçu e Maciel, são os maiores fornecedores desta matéria orgânica dissolvida na Baía de Paranaguá, pois este conjunto apresenta uma extensa e plana bacia de drenagem margeada por manguezais (Noernberg, 2001).

#### **2.2.6.4 Nutrientes**

As características tróficas e de nutrientes da Baía de Paranaguá é o resultado de diversas interações entre processos hidrodinâmicos e diferentes mecanismos de depósito e suprimento, tais como remoção biológica, aporte fluvial, interações entre sedimento-coluna de água, e descarga de efluentes provenientes da cidade de Paranaguá, (Lana *et al.*, 2001).

O estado trófico da Baía de Paranaguá varia sazonal e espacialmente, de quase oligotrófico no inverno no setor inferior, para eutrófico durante o verão nos setores meridiano e superior da baía. As taxas de fluxos de materiais orgânicos e nutrientes dissolvidos provenientes dos manguezais ainda são desconhecidas na escala deste estudo (Marone *et al.*, 2005).

Na análise das variações temporais e espaciais no comportamento dos nutrientes inorgânicos dissolvidos de Knoppers *et al.*, (1987), observou-se que, com exceção do silicato, todas as propriedades exibiram um comportamento não conservativo. O comportamento conservativo ocorre esporadicamente para maioria das propriedades em condições de alta descarga fluvial e forte estratificação, explicada pelo decaimento do tempo de residência dificultando a absorção biológica de nutrientes.

Para o silicato, e em certas ocasiões para o nitrato, o comportamento conservativo indica que a drenagem continental é a principal fonte destes constituintes (Knoppers *et al.*, 1987). No entanto, são esperadas variações temporais no comportamento do silicato, visto que foram detectadas blooms de diomáceas (Brandini, 1985b).

No estudo de Knoppers *et al.*, (1987) verificou-se que a parte mediana da Baía de Paranaguá representa uma fonte de fosfato, razão atribuída às descargas de esgoto doméstico provenientes do Rio Itiberê.

A razão N:P varia espacialmente e temporalmente. Máximos valores ocorrem nos períodos de chuva na parte interna da baía devido à descarga continental. Porém, a

predominância de baixas razões N:P indica que o nitrogênio é um fator potencial de limitação, provavelmente como resultado da denitrificação dos sedimentos de superfície e águas de fundo, (Lana *et al.*, 2001).

Knoppers *et al.*, (1987) observaram um comportamento preferencialmente não conservativo para o nitrato, identificando um sorvedouro desta propriedade na parte mediana da baía, atribuído à remoção biológica, enquanto que as variações temporais nas concentrações são atribuídas às alterações nas descargas dos rios.

Fluxos não conservativos de fósforo inorgânico dissolvido (DIP) são positivos em todos os três setores da Baía de Paranaguá durante o período de chuvas. Durante o período de seca, apenas o setor inferior apresenta fluxos positivos de DIP, (Marone *et al.*, 2005)..

#### **2.2.6.5 Clorofila**

Confirmando Brandini (1985b), ao afirmar que a precipitação é o principal fator que afeta, de maneira indireta, a concentração de clorofila na Baía de Paranaguá, Noernberg (2001) salienta que a variação da clorofila tende a uma sazonalidade, com maiores concentrações no verão, além de que a variação espaço-temporal de clorofila na Baía de Paranaguá apresenta um aumento gradativo de seus valores máximos em direção à Antonina.

#### **2.2.6.6 Aspectos biológicos**

Estudo de Rezende (1995) sugere que forçantes meteorológicas relacionadas a processos de meso escala são um importante fator de controle de populações de fitoplâncton na parte inferior da baía.

Os padrões de distribuição de zooplâncton estão fortemente relacionados com o gradiente de salinidade local, sendo, portanto definidas quatro associações holoplanctônicas (Lopes *et al.*, 1998) 1) grupo estuarino ( $S < 15$ ); 2) grupo marinho-estuarino ( $15 < S < 25$ ), 3) grupo marinho-eurihalino ( $S > 25$ ), e 4) grupo de biota marinha estenohalina ( $S > 32$ ), que penetra no setor inferior da baía especialmente durante as marés de sizígia na estação seca, (Marone *et al.*, 2005).

### **2.3 Aspectos Humanos**

A ocupação humana está concentrada principalmente na margem sul da Baía de Paranaguá, com densidade de 200 habitantes por km<sup>2</sup>, enquanto que na margem norte a densidade está em torno de 2 habitantes por km<sup>2</sup>. A taxa de crescimento populacional é menor que 3% ao ano, tendo decrescido ultimamente, (Marone *et al.*, 2005).

Os principais impactos ambientais da Baía de Paranaguá estão relacionados às atividades portuárias (dragagem, transporte marítimo, despejo de substâncias, invasão de espécies exóticas via águas de lastro) e às atividades agrícolas, responsáveis pelo despejo de 800 kg de pesticidas por ano (IPARDES, 1989).

Na Baía de Paranaguá localizam-se o porto Barão de Tefé (desativado), os Terminais Portuários da Ponta do Félix S.A. no município de Antonina, e o Porto de Paranaguá no município de Paranaguá. A existência destes terminais portuários ao longo do eixo leste-oeste do CEP exige manutenção constante dos canais de acesso, realizada por meio de dragagens (Procopiak *et al.*, 2007).

O porto de Paranaguá constitui uma fonte adicional antropogênica de resíduos de fertilizantes provenientes das operações de carga e descarga de produtos. Os navios que freqüentam atualmente os portos de Paranaguá e Antonina são: a) navios graneleiros para cargas agrícolas a granel; b) navios graneleiros para descarga de fertilizantes; c) navios graneleiros mistos de carga seca (ex: madeira); d) navios cargueiros convencionais para cargas comuns; e) navios frigoríficos; f) navios *Minibulkers* ou *Handybulker*, para exportação de barras de aço; g) navios full-contêineres; h) navios *Ro-Ro* e/ou *Pure Carrier*, para transporte de automóveis; e i) navios tanque para produtos inflamáveis (derivados de petróleo), navios tanque para óleos vegetais, navios tanque químicos e navios tanque para transporte de gás liquefeito petróleo (Soares & Lamour, 2008).

A análise estatística portuária realizada no estudo de Soares&Lamour (2008), abrangendo o período entre 1985 e 2005, mostra um crescimento substancial de navios porta-contêineres e *Ro-Ro* indicando a necessidade de aprofundamentos significativos através de dragagens no canal de acesso ao porto a fim de atender navios de tecnologia mais avançada.

As atividades de dragagens necessárias para manutenção das operações portuárias removem mais de dois milhões de metros cúbicos por ano (Soares e Marone, 1997) causando resuspensão de sedimentos anóxicos. A fim de se reduzir os impactos ambientais associados às operações de dragagem devem ser restritas a períodos de seca, ou baixa vazão fluvial, Marone *et al.*, 2005.

Atividades humanas tais como ocupação urbana desordenada, extração ilegal de madeira e atividades pecuárias, contribuem para a degradação do solo e conseqüente aumento da carga de sedimentos na baía (Andriguetto-Filho, 1993). Verifica-se que o processo de assoreamento das Baías de Antonina e de Paranaguá vem ocorrendo de forma acelerada em decorrência de fatores diversos tais como práticas agrícolas inadequadas, desrespeito às matas ciliares dos rios, invasão urbana de áreas de

mangues e aumento da vazão natural do Rio Cachoeira via canal de fuga após operação da Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza nos anos 70 (De Paula e Cunico, 2007).

Nos municípios de Paranaguá, Morretes e Antonina, dentre as principais fontes de poluição observadas, destacam-se: depósito de lixo, fertilizantes, matéria orgânica, produtos químicos diversos, retirada de sedimentos e armazenagem de diversos produtos químicos (Procopiak *et al.*, 2007).

O despejo de esgotos urbanos possivelmente representa uma fonte significativa de poluição. Todos os impactos citados devem, de alguma forma, afetar a dinâmica dos elementos químicos no corpo de água do sistema estuarino, (Marone *et al.*, 2005).

### 3 ASPECTOS DE MODELAGEM

Este capítulo objetiva fornecer uma visão geral da modelagem numérica aplicada a ambientes estuarinos, de forma que as peculiaridades do modelo Delft3D são introduzidas no decorrer do texto.

A modelagem numérica hidrodinâmica, de qualidade da água e de processos de transporte de sedimentos em estuários ainda envolve algumas imprecisões, a citar (Falconer *et al.*, 1996):

- Aspectos de mecânica dos fluídos (ex: turbulência)
- Processos físicos (ex: erosão e deposição de sedimentos coesivos)
- Processos químicos e biológicos relacionados a vários constituintes de qualidade da água (ex: taxa de decaimento de nitratos)
- Métodos numéricos (ex: tratamento das descontinuidades matemáticas)
- Inserção das condições de contorno (ex: batimetria, correntes, elevação do nível da água e rugosidade de fundo)

Modelos numéricos aplicados a processos estuarinos envolvem a resolução das equações diferenciais governantes da quantidade de movimento (equações de Navier-Stokes) e da conservação da massa (ou da equação da continuidade) em direções ortogonais para duas ou três dimensões e a equação do transporte de massa para cada constituinte de qualidade da água ou processo de transporte de sedimentos.

As equações da quantidade de movimento associadas às equações de conservação de massa e de sal e à equação de estado da água do mar, constituem um sistema de seis equações a derivadas parciais tendo por incógnitas os componentes de velocidade ( $u$ ,  $v$  e  $w$ ) através da região de interesse nas respectivas direções  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e no tempo, pressão ( $p$ ), densidade ( $\rho$ ) e elevação de nível ( $z$ ).

Para a variação da concentração dos constituintes de qualidade da água e fluxo de sedimentos em suspensão ou de fundo as equações de advecção-difusão ou equação de transporte de massa são resolvidas considerando-se os efeitos de difusividade turbulenta, dispersão, difusão induzida pelo vento, erosão, deposição, decaimento e interações químicas e biológicas, (Falconer *et al.*, 1996).

A solução das equações envolve a discretização da região de interesse em uma malha retangular ou curvilínea e aplicação de métodos numéricos para resolução das equações, tais como diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos, resolvendo-as para cada volume da grade para cada passo de tempo. O Delft3D utiliza o método de



diferenças finitas, que resolve as equações diferenciais com aproximação baseada nas séries de Taylor. Em cada volume de grade são calculadas cinco ou mais equações, através de esquemas explícitos ou implícitos.

Em esquemas numéricos explícitos pode-se explicitar o termo desconhecido em um tempo futuro em função de termos conhecidos, a partir de termos atuais e passados. Apresentam maior facilidade computacional de resolução, porém estão sujeitos a critérios de estabilidade numérica, de forma que o passo de tempo fica dependente da resolução da grade. Em esquemas numéricos implícitos, utilizam-se termos do tempo futuro e tempos atuais e passados através de sistema de equações para encontrar termos de tempos futuros. Os esquemas implícitos apresentam maior complexidade computacional, porém são incondicionalmente estáveis, possibilitando um relaxamento na resolução da grade.

Métodos explícitos estão sujeitos à condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy em que o passo de tempo é escolhido de forma que o número de Courant ( $Cr$ ) definido na equação 1 não seja superior a um.

$$Cr = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

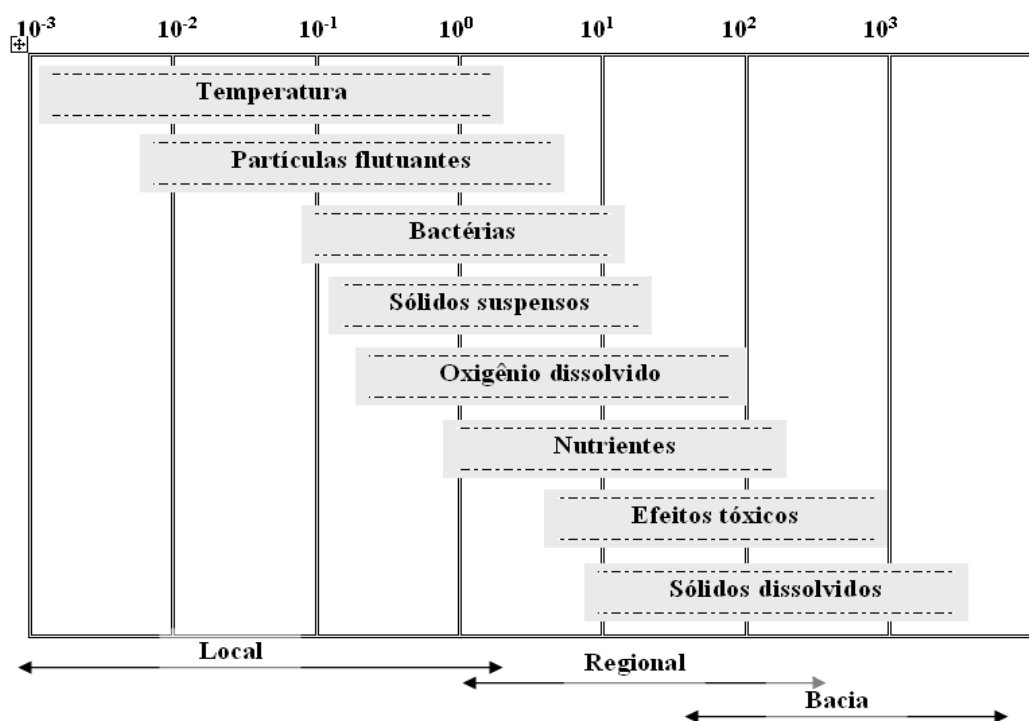
$Cr$	Número de Courant	-
$\Delta t$	Passo de tempo em segundos	s
$\{\Delta x, \Delta y\}$	Espaçamento mínimo de grade na direção x ou y em metros	m
$g$	Aceleração da gravidade	$\text{m.s}^{-2}$
$H$	Profundidade total	m

Na discretização espacial dos termos advectivos horizontais o Delft3D resolve de forma implícita. Na discretização temporal o Delft3D utiliza um método denominado Direção Implícita Alternada, em que o passo de tempo é dividido em dois estágios, cada qual correspondendo à metade do passo de tempo, em que todos os termos das equações são resolvidos. Os termos advectivos e o termo de gradiente de elevação de nível são resolvidos de forma alternada, tal que se em um estágio o termo é resolvido de forma explícita, no estágio seguinte será resolvido de forma implícita. Os termos de fricção de fundo são resolvidos de forma implícita em ambos os estágios. Na direção vertical, um método implícito é aplicado (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

Na discretização do modelo, ao se determinar as escalas temporais e espaciais, deve-se levar em conta os seguintes aspectos (Lung, 1993):

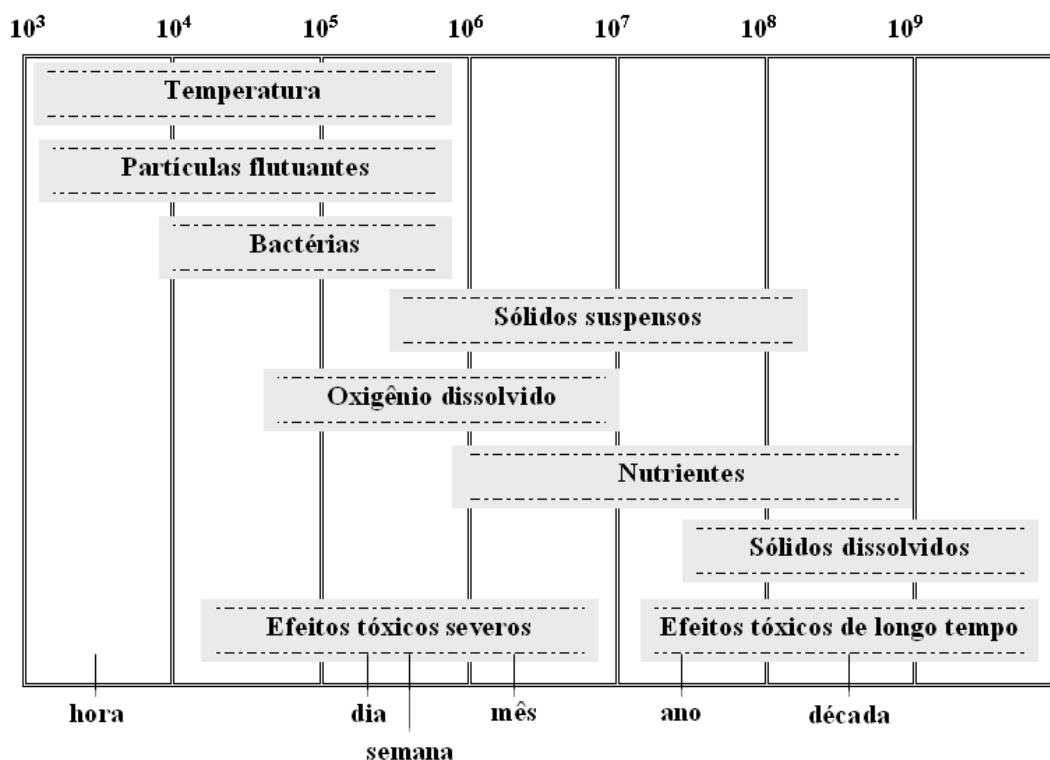
- A extensão da variável e do problema de qualidade da água nas escalas espacial e temporal;
- Os intervalos espaciais e temporais para processamento do modelo (dimensão da malha e passo de tempo).

As figuras 3 e 4 apresentam as escalas típicas de espaço e tempo para vários problemas de qualidade da água. Escalas de tempo pequenas, de horas a dias, estão geralmente relacionadas com escalas de espaço locais e regionais, e representam as principais respostas referentes a entradas randômicas de constituintes no sistema estuarino, tais como despejos industriais ou domésticos associados a descargas pontuais desprovidas de fontes fixas. Dentre os principais parâmetros de qualidade da água incluem o oxigênio dissolvido, bactérias e residual de cloro (Lung, 1993).



**Fig. 3 – Escalas espaciais para problemas de qualidade da água (em milhas). Adaptado de Lung (1993).**

As escalas de tempo de meses a anos estão geralmente acopladas com escalas de espaço regionais, e representam as principais respostas a entradas com transientes sazonais tais como fontes difusas provenientes da parte superior da bacia de drenagem e tributários, bem como fontes de entradas pontuais de estações de tratamento. Dentre os principais parâmetros de qualidade da água envolvidos incluem o oxigênio dissolvido e nutrientes (Lung, 1993).



**Fig. 4 – Escalas temporais para problemas de qualidade da água (em segundos). Adaptado de Lung (1993).**

Com relação ao tamanho e configuração dos elementos da malha de discretização, deve-se atentar para a taxa de variação da concentração do constituinte, tal que para uma elevada taxa de variação devem-se utilizar pequenos segmentos de malha. Por outro lado, deve-se atentar para o fato da eficiência computacional, evitando-se utilizar elementos pequenos em regiões de baixa variabilidade.

Deve ser considerado, também, que as propriedades químicas podem ter comportamento conservativo ou não conservativo. Para o caso de uma propriedade química conservativa, se uma descarga constante de um poluente é introduzida em um estuário, a força de maré promoverá mistura distribuindo-o em ambos os sentidos, estuário acima e abaixo, e a região de máxima concentração será na proximidade do lançamento. Se o poluente possui o mesmo comportamento, tanto em água doce como em água salgada, assim que atingido um estado permanente, sua distribuição será diretamente relacionada com a distribuição de salinidade, e, portanto sua previsão pode ser baseada na informação da distribuição da água doce no estuário (Dyer, 1973).

A previsão de poluentes não conservativos torna-se mais difícil, visto que as concentrações decrescem não somente por ocasião da mistura, mas também com relação ao tempo (Dyer, 1973).

### 3.1 Formulação de modelagem hidrodinâmica

Em modelos numéricos 3D, normalmente considera-se a aceleração vertical muito pequena em comparação com a aceleração decorrente da gravidade, atribuindo-se uma distribuição hidrostática da pressão. Os campos de velocidade e de elevação da superfície da água são obtidos através da solução da equação de Navier-Stokes (equações 2,3 e 4) e da continuidade (equação 5). Estas equações podem ser representadas de uma forma geral, como (Falconer, 1996):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = X - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} +$$

Eq. 2

$$n \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \left[ \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = Y - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial y} +$$

Eq. 3

$$n \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \left[ \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right]$$

$$Z = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z}$$

Eq. 4

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Eq. 5

Onde:

u,v,w	Componentes de velocidade integradas por camadas nas direções das três coordenadas x,y,z	m.s <sup>-1</sup>
t	Tempo	S
X, Y, Z	Forças de corpo nas direções x,y,z	m.s <sup>-2</sup>
r	Densidade do fluido	kg.m <sup>-3</sup>
P	Pressão do fluido	N.m <sup>-1</sup>
n	Coeficiente de viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
$\overline{ru'u'}$ ,	Componentes das tensões de Reynolds na direção x nos planos x,	N/m

$$\begin{aligned} & \overline{ru'v'}, \quad y,z \\ & \overline{ru'w'} \\ & \overline{ru'v'}, \quad \text{Componentes das tensões de Reynolds na direção } y \text{ nos planos } x, \quad \text{N/m} \\ & \overline{rv'v'}, \quad y,z \\ & \overline{rv'w'} \end{aligned}$$

Os termos numerados na equação da quantidade de movimento (equação 2) representam:

1. Aceleração local
2. Aceleração advectiva
3. Forças de corpo
4. Gradiente de pressão
5. Tensões de atrito laminar
6. Tensões de atrito turbulento

Em modelagem de estuários de dimensões reduzidas o efeito de Coriolis pode ser desconsiderado, de forma que as forças de corpo aplicadas resumem-se a  $X=0$ ,  $Y=0$  e  $Z=-g$ . O efeito de Coriolis varia com a latitude e é nulo no equador. A água doce da descarga fluvial tende a ser desviada para a esquerda (hemisfério sul), tendendo a existir um leve gradiente de salinidade lateral na baía. No caso de estuários de maiores dimensões, deve-se incluir este termo de forma que:

$$\begin{aligned} X &= 2vwsin j \\ Y &= -2uwsin j \end{aligned} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

$j$	Latitude no local de interesse ( $j = \sim 25^\circ$ para Baía de Paranaguá)	Graus
$w$	Módulo do vetor velocidade angular de rotação da Terra ( $w = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$ )	$\text{rad.s}^{-1}$

O termo referente à pressão pode ser representado em função de elevação da superfície da água, integrando-se a equação 4 em relação à  $z$  obtém-se:

$$P(z) = P_a + g \int_z^z r dz \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$z$  Elevação da superfície da água acima (positivo) ou abaixo (negativo) do nível de referência m

$P_a$  Pressão atmosférica N.m<sup>-1</sup>

Derivando-se a equação 7 em relação a  $x$ , obtém-se:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_a}{\partial x} + g \frac{\partial \left( \int_z^z r dz \right)}{\partial x} \quad \text{Eq. 8}$$

Visto que a elevação de nível é dependente espacialmente e temporalmente ( $z = z(x, y, t)$ ), aplica-se a regra de Leibnitz, e obtém-se:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_a}{\partial x} + g r_z \frac{\partial z}{\partial x} + g \int_z^z \frac{\partial r}{\partial x} dz \quad \text{Eq. 9}$$

Multiplicando-se por  $-1/r$  e considerando-se  $r_z \approx r$ , obtém-se:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{1}{r} g \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{g}{r} \int_z^z \frac{\partial r}{\partial x} dz \quad \text{Eq. 10}$$

As três parcelas no termo direito da equação correspondem respectivamente aos efeitos barométrico, barotrópico e baroclínico no movimento. Em geral, a variação espacial da pressão atmosférica é mínima e o efeito barométrico pode ser eliminado. O efeito baroclínico, determinado pela temperatura e predominantemente pela salinidade, em termos quantitativos representa aproximadamente uma ordem de grandeza menor que o efeito barotrópico (Miranda *et al.*, 2002).

Os termos de tensões de Reynolds são representados pela hipótese de Boussinesq, tal que para a equação 2 tem-se:

$$\begin{aligned}\overline{u'u'} &= e \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ \overline{u'v'} &= e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \overline{u'w'} &= e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)\end{aligned}\tag{Eq. 11}$$

Onde  $e$  é o coeficiente cinemático turbulento de viscosidade ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Em geral, para os estuários  $e \gg \nu$  e o termo de viscosidade laminar pode ser descartado.

Para definir o coeficiente de viscosidade turbulento utilizam-se formulações específicas para turbulência, podendo-se de uma maneira mais simples utilizar um valor fixo de coeficiente de viscosidade turbulenta (normalmente entre  $10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), ou então optar por uma formulação baseada no conceito de viscosidade turbulenta de Kolmogorov e Prandtl. Neste caso, a viscosidade turbulenta é relacionada a uma escala de distância característica e a uma escala de velocidade (WL | Delft Hydraulics, 2007b). Na modelagem hidrodinâmica foi utilizado coeficiente de viscosidade turbulenta de  $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  conforme testes de sensibilidade aplicados por Herrling (2003) e valores utilizados por Osinski (2007).

As equações são resolvidas numericamente para as variáveis  $u$ ,  $v$ ,  $w$  e  $z$  em todo domínio do estuário em um domínio de tempo. Para estuários classificados como bem misturados, pode-se considerar valores homogêneos das propriedades ao longo da vertical permitindo aproximar as equações tridimensionais (3D) para equações bidimensionais integradas na vertical (2DH). Esta aproximação reduz o custo computacional para as soluções hidrodinâmicas e permite a aplicação dos modelos numéricos de qualidade da água e transporte de sedimentos para períodos mais extensos (Falconer, 1996). Para o caso da Baía de Paranaguá foi utilizado o modelo bidimensional que se justifica para as características de mistura da baía para o período de estudo, como comentado mais adiante na metodologia.

Para cálculo da densidade, utiliza-se a equação de estado da água do mar tal que a densidade é dependente da salinidade, temperatura e pressão. No Delft3D pode-se optar por utilizar a equação de estado desenvolvida por Eckart que despreza o efeito da pressão na densidade ( $\rho = \rho(S, T, 0)$ ), ou optar por utilizar a equação de estado da UNESCO.

As equações hidrodinâmicas utilizadas pelo Delft3D-FLOW estão representadas no apêndice A.

### 3.2 Formulação de modelagem de qualidade da água

Um sistema de um corpo de água pode ser representado através da combinação de células computacionais em uma, duas ou três dimensões, e desta forma, pode ser estudado o transporte de substâncias através destas células, e por assim dizer, por meio do corpo de água, (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

Na modelagem de propriedades de qualidade da água ou transporte de sedimentos em estuários, pode-se utilizar a equação da conservação da massa para representar em termos gerais um dado constituinte no meio fluído. A equação da advecção-difusão para um soluto  $y$  pode ser representada por:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial uy}{\partial x} + \frac{\partial vy}{\partial y} + \frac{\partial wy}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'y'}) + \frac{\partial}{\partial y}(\overline{v'y'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w'y'}) = Y_0 + Y_d + Y_k \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$y$	Concentração média no tempo do soluto	$\text{mg.l}^{-1}$
$y'$	Flutuações turbulentas da concentração do soluto	$\text{mg.l}^{-1}$
$y_0$	Fonte ou sorvedouro do soluto	$\text{mg.l}^{-1}\text{s}^{-1}$
$y_d$	Decaimento ou taxa de crescimento do soluto	$\text{mg.l}^{-1}\text{s}^{-1}$
$y_k$	Taxa de transformação cinética total do soluto	$\text{mg.l}^{-1}\text{s}^{-1}$

Os termos numerados na equação de advecção-difusão (equação 10) representam:

1. Variação local do soluto
2. Transporte do soluto por advecção
3. Efeitos turbulentos
4. Fontes, sorvedouros, taxa de decaimento/crescimento e efeitos de transformação cinética

Com relação aos termos relacionados ao fluxo de massa do soluto decorrente de flutuações turbulentas, por analogia à lei da difusão de Fick, assume-se que o fluxo do soluto é proporcional ao gradiente da concentração média do soluto na direção do decréscimo do gradiente, tal que:



$$\begin{aligned}\overline{u'y'} &= -D_{tx} \frac{\partial y}{\partial x} \\ \overline{u'y'} &= -D_{ty} \frac{\partial y}{\partial y} \\ \overline{u'y'} &= -D_{tz} \frac{\partial y}{\partial z}\end{aligned}\tag{Eq. 13}$$

Onde

$$D_{tx}, D_{ty}, D_{tz} \quad \text{Coeficientes de difusão turbulenta nas direções x, y e z.} \quad \text{m}^2.\text{s}^{-1}$$

O modelo de qualidade da água resolve numericamente as equações de advecção-difusão-reação. Através das equações de transporte hidrodinâmico, e pelo princípio da conservação da massa, o modelo administra o transporte de massa das substâncias estudadas entre cada célula computacional. A fim de estudar substâncias não-conservativas, que podem se transformar em outras substâncias através de processos biogeoquímicos, incluem-se os processos de qualidade da água para cálculo do balanço de massa. Por fim, pode ser adicionada a massa de substâncias a uma célula computacional representando uma fonte externa a ser estudada, tal como descarga de poluentes, (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

O balanço de massa pode ser representado de forma simplificada através da seguinte equação:

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \cdot \left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_{Tr} + \Delta t \cdot \left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_P + \Delta t \cdot \left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_S \tag{Eq. 14}$$

Onde:

$M_i^t$	Massa no início do passo de tempo	kg
$M_i^{t+\Delta t}$	Massa no fim do passo de tempo	kg
$\left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_{Tr}$	Variações de massa decorrente de transporte	kg.s <sup>-1</sup>
$\left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_P$	Variações de massa decorrente de processos biogeoquímicos	kg.s <sup>-1</sup>
$\left( \frac{\Delta M}{\Delta t} \right)_S$	Variações de massa devido à existência de fontes ou sorvedouros	kg.s <sup>-1</sup>

As variações de massa decorrente de transporte incluem o transporte advectivo e o transporte por dispersão. O transporte advectivo é derivado do módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, assim como a dispersão na escala vertical (importante fator a ser considerado em ambientes estratificados). O conceito de dispersão aqui difere do relacionado à difusão no módulo hidrodinâmico, e é relacionado aos transportes de água nas sub-escalas da grade numérica, (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

As variações decorrentes de processos biogeoquímicos incluem processos tais como re-aeração, deposição, adsorção, nitrificação e denitrificação, bem como processos biológicos tais como produção primária e consumo de fitoplâncton. Desta forma, os processos de qualidade de água convertem uma substância em outra, (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

As variações decorrentes de fontes e sorvedouros incluem a inserção de massa por descargas e retiradas por extração. A massa de água que flui para dentro ou fora da área modelada é derivada do módulo hidrodinâmico, (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

Para modelar o transporte de substâncias, a área em estudo é dividida em pequenas caixas ou volumes definidos como célula computacional, definida por seu volume e por suas dimensões nas três direções ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ), a depender da dimensão do modelo (1D, 2D ou 3D). Os volumes das diferentes células computacionais podem ser diferentes e compartilham áreas superficiais com outras células por onde ocorrem trocas de massa.

O transporte advectivo é representado por:

$$T_{x_0}^A = v_{x_0} A C_{x_0} \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

$T_{x_0}^A$	Transporte advectivo em $x=x_0$	$\text{g.s}^{-1}$
$v_{x_0}$	Velocidade em $x=x_0$	$\text{m.s}^{-1}$
$A$	Área da superfície em $x=x_0$	$\text{m}^2$
$C_{x_0}$	Concentração em $x=x_0$	$\text{g.m}^{-3}$

O transporte por dispersão, de acordo com a lei de Fick, é representado por:

$$T_{x_0}^D = - D_{x_0} A \left. \frac{\partial C_{x_0}}{\partial x} \right|_{x=x_0} \quad \text{Eq. 16}$$

Onde:

$T_{x_0}^D$	Transporte dispersivo em $x=x_0$	$\text{g.s}^{-1}$
$D_{x_0}$	Coeficiente de dispersão em $x=x_0$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$\left. \frac{\partial C_{x_0}}{\partial x} \right _{x=x_0}$	Gradiente de concentração em $x=x_0$	$\text{g.m}^{-4}$

O transporte de massa decorrente do transporte advectivo e transporte por dispersão juntos são representados por:

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t. \left( v_{x_0} C_{x_0} - v_{x_0+\Delta x} C_{x_0+\Delta x} \right) A + \Delta t. \left( D_{x_0+\Delta x} \left. \frac{\partial C_{x_0+\Delta x}}{\partial x} \right|_{x=x_0+\Delta x} - D_{x_0} \left. \frac{\partial C_{x_0}}{\partial x} \right|_{x=x_0} \right) A \quad \text{Eq. 17}$$

Na última equação, dividindo-se pelo volume ( $\Delta x \Delta y \Delta z$ ) e pelo passo de tempo,  $\Delta t$ , obtém-se a seguinte equação para uma dimensão:

$$\frac{C_i^{t+\Delta t} - C_i^t}{\Delta t} = \frac{D_{x_0+\Delta x} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x_0+\Delta x} - D_{x_0} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x_0}}{\Delta x} + \frac{v_{x_0} C_{x_0} - v_{x_0+\Delta x} C_{x_0+\Delta x}}{\Delta x} \quad \text{Eq. 18}$$

A forma analítica da equação anterior aplicada para as três dimensões e incluindo-se os termos de fontes e sorvedouros e reação de processo, resulta em:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} + S + f_R(C, t) \quad \text{Eq. 19}$$

Onde:

$D_x$	Coeficiente de dispersão na direção x	$m^2.s^{-1}$
$D_y$	Coeficiente de dispersão na direção y	$m^2.s^{-1}$
$D_z$	Coeficiente de dispersão na direção z	$m^2.s^{-1}$
$V_x$	Velocidade na direção x	$m.s^{-1}$
$V_y$	Velocidade na direção y	$m.s^{-1}$
$V_z$	Velocidade na direção z	$m.s^{-1}$
$S$	Fontes de descarga	$g.m^{-3}.s^{-1}$
$f_R$	Termos de reação de processos em função da concentração e do tempo	$g.m^{-3}.s^{-1}$

No caso de sistemas cujas massas de água podem entrar e sair da área de estudo através dos contornos abertos (levadas pelas marés, por exemplo), muito provavelmente as características das massas de água que previamente saíram do sistema serão semelhantes às que entrarão logo após, diferindo muitas vezes das massas de água definidas nos contornos abertos. A fim de ajustar essas características de forma suave, o Delft3D-WAQ utiliza a condição de espaço de tempo de Thatcher-Harleman, definida por:

$$C(t_0 + t) = (C(t_0) - C_B(t)) \cos\left(\frac{pt}{2T}\right) + C_B(t) \quad \text{Eq. 20}$$

Tal que  $(t_0 < t < t_0 + T)$

Onde:

$t_0$	Tempo em que o fluxo de saída inverte para fluxo de entrada	s
$t$	Tempo após $t_0$	s
$C$	Concentração do contorno aberto simulada	$mg.l^{-1}$
$C_B$	Concentração de contorno aberto definida pelo usuário	$mg.l^{-1}$
$T$	Espaço de tempo de Thatcher-Harleman	s

Desta forma, a variação da concentração de uma substância a partir do último valor de fluxo de saída no contorno aberto para o valor determinado nas condições iniciais segue uma função de forma senoidal conforme a figura 5. Especificada

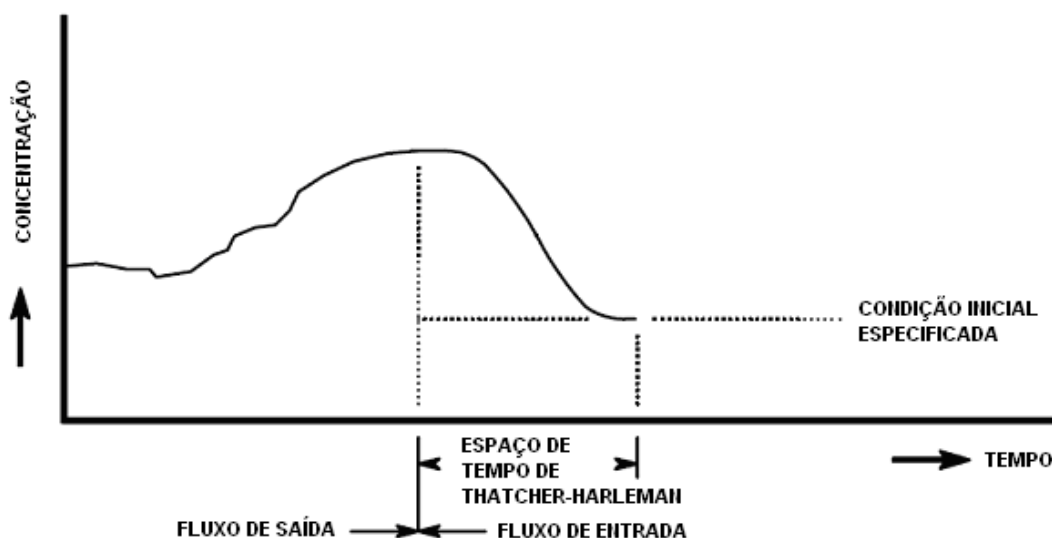


Fig. 5 – Condição de Thatcher-Harleman para concentrações no contorno aberto.

### 3.3 Modelagem de qualidade da água com Delft3D-WAQ

O Delft3D-WAQ resolve as equações de advecção-difusão-reação em uma grade computacional para diversos tipos de substâncias. As informações das condições hidrodinâmicas (corrente, elevações de nível, salinidade, densidade, viscosidade turbulenta e tensão de atrito de fundo) são obtidas a partir do acoplamento com o módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW.

Dentre as substâncias disponíveis para simulações pelo Delft3D-WAQ citam-se:

- Substancias conservativas
- Substancias não-conservativas
- Material em suspensão
- Temperatura
- Nutrientes (amônia, nitrito, nitrato, fosfato e silicato)
- Matéria orgânica
- Oxigênio dissolvido
- Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO)
- Alga
- Bactéria
- Metais pesados
- Micro poluente orgânicos

O Delft3D-WAQ permite especificar uma larga gama de processos físicos e biogeoquímicos correlacionados. Estes processos ficam armazenados em uma biblioteca de processos do Delft3D (PLCT – Process library configuration tool) e podem ser selecionados e modificados de acordo com os interesses do usuário.

Dentre outras ferramentas úteis disponíveis no pacote do Delft3D para desenvolver o modelo de qualidade da água, estão o:

- PLCT → Biblioteca dos processos disponíveis para modelagem da qualidade da água. O usuário deverá selecionar os processos de interesse, bem como as formulações a serem utilizadas e seus parâmetros de entrada;
- Delft3D-Quickin → Utilizado para preparo e manipulação de dados baseados na grade, tais como condições iniciais, processos espacialmente variados ou funções de forçantes;
- Delft3D-GPP → Ferramenta bastante útil para visualização e animação dos resultados de simulação;
- Delft3D-DIDO → editor e acoplador de grade para modificar a grade utilizada para o processamento hidrodinâmico na simulação dos processos de qualidade da água.

A agregação dos resultados hidrodinâmicos resulta inevitavelmente na perda de informação, porém esta técnica é viável, pois normalmente as grades para simulações de qualidade da água exigem menos resolução que as grades hidrodinâmicas. A grande vantagem de se utilizar a agregação é a redução de tempo computacional. Uma maneira de checar se o nível de agregação não prejudica o resultado é repetir a simulação de salinidade para o modelo de qualidade da água, devendo obter resultados equiparáveis aos do modelo hidrodinâmico.

As etapas básicas para modelagem de qualidade da água com o Delft3D são:

- Obter os resultados das simulações hidrodinâmicas e prepará-los para o uso na simulação de qualidade da água;
- Definir as substâncias e processos a serem incluídos na simulação de qualidade da água;
- Definir a simulação de qualidade da água baseada nas etapas anteriores (definir condições iniciais, condições de contorno, cargas de substâncias, tempo de simulação, variáveis de saída, etc.);
- Efetuar a simulação;
- Checar os resultados.

Estas etapas estão representadas em diagrama na figura 6.

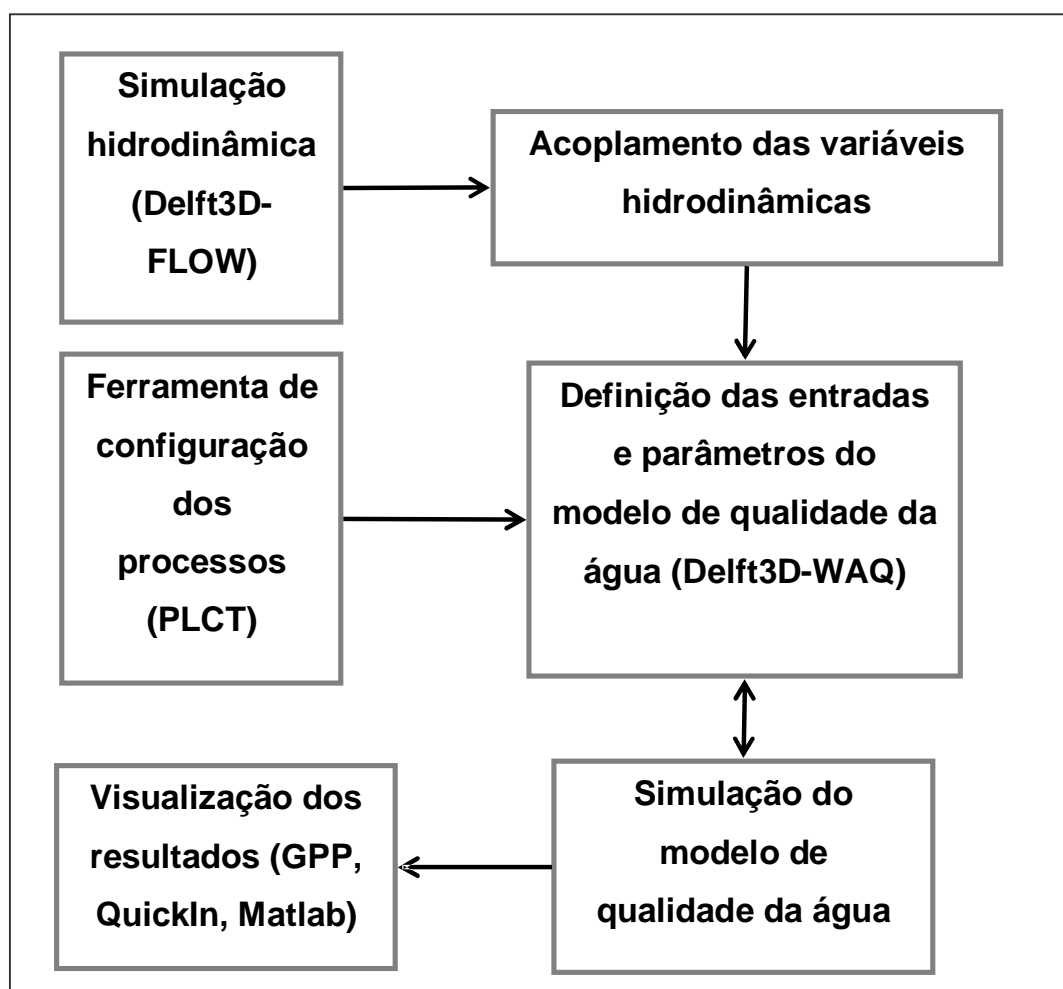


Fig. 6 – Etapas básicas para modelagem da qualidade da água com o Delft3D.

### 3.4 Aspectos teóricos do Material Particulado em Suspensão

Segundo Uncles *et al.* (2001), mais de 90% dos sedimentos depositados nos oceanos são transportados em suspensão através dos estuários. A concentração do material particulado em suspensão depende não somente do range de maré e capacidade de mistura do sistema estuarino, como também varia através dos ciclos de maré e em resposta ao aporte de água doce sazonal (Hardisty, 2007).

Alterações na morfologia dos estuários são geradas pela variação espacial média do transporte de sedimentos em suspensão considerada sobre um período representativo de tempo. Portanto, um gradiente positivo ou negativo na taxa de transporte causa erosão ou sedimentação de material no leito de fundo. As modificações na batimetria alteram a magnitude de corrente, de forma que a erosão ocasiona um decréscimo na corrente enquanto que a deposição ou acréscimo do leito de fundo provoca um

acréscimo na corrente. Uma situação de equilíbrio deve ser estabelecida quando erosão e deposição forem reduzidas por alterações das correntes (Dyer, 2000).

Os sólidos presentes na água podem ser classificados de acordo com suas características físicas ou químicas. No que concerne às características físicas, os sólidos podem ser classificados em: (a) sólidos em suspensão; (b) sólidos coloidais ou (c) sólidos dissolvidos (Von Sperling, 1996).

Em relação às características químicas, podem ser sólidos orgânicos ou inorgânicos. Ao submeter os sólidos a uma temperatura elevada (550°C) a fração orgânica é volatilizada (sólidos voláteis), permanecendo após a combustão apenas a matéria inorgânica ou mineral (Von Sperling, 1996).

A classificação por tamanho dos sólidos determina que partículas de pequenas dimensões, capazes de atravessar um filtro de determinado tamanho correspondem a sólidos dissolvidos, enquanto que as de maiores dimensões, retidas pelo filtro são considerados sólidos em suspensão (Von Sperling, 1996).

Sedimento é o material particulado formado primeiramente pela desintegração física ou química das rochas da crosta terrestre (inorgânicos) e por vários processos biológicos (orgânicos). De acordo com o tamanho os sedimentos podem ser classificados segundo a tabela 6

**Tabela 6 – Escala de tamanho do sedimento.**

Classe	Diâmetro (mm)
Cascalho	> 2.0
Areia muito grossa	2.0 – 1.0
Areia grossa	1.0 – 0.5
Areia média	0.5 – 0.25
Areia fina	0.5 – 0.125
Areia muito fina	0.125 – 0.062
Silte grosso	0.062 – 0.031
Silte médio	0.031 – 0.016
Silte fino	0.016 – 0.008
Silte muito fino	0.008 – 0.004
Argila grossa	0.004 – 0.0020
Argila média	0.002 – 0.0010
Argila fina	0.0010 – 0.0005
Argila muito fina	0.0005 – 0.00024
Colóides	< 0.00024



Partículas orgânicas muito finas juntamente com frações de silte e argila, transportadas em suspensão como sólidos coloidais, são caracterizados como sedimentos coesivos, sobre as quais forças eletroquímicas são predominantes. Os principais processos são a adsorção e a floculação. Para partículas maiores, caracterizadas como sedimentos não coesivos, os principais processos são a deposição e resuspensão.

#### **3.4.1 Sedimentos coesivos**

O comportamento dos sedimentos coesivos ocupa um importante papel na qualidade da água. A presença de materiais em suspensão eleva a turbidez restringindo a penetração da luz na camada de água inibindo a fotossíntese, e conseqüentemente, a produção primária. O destino dos contaminantes na água está fortemente relacionado aos materiais em suspensão em decorrência de sua grande capacidade de adsorção (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

Como material dissolvido, o sedimento é transportado por advecção e difusão turbulenta e, adicionalmente, o destino dos sedimentos suspensos finos é determinado por sedimentação e deposição, bem como processos no leito do fundo, tais como consolidação, bioturbação e resuspensão. No Delft3D-WAQ os processos de sedimentação e erosão são baseados no conceito de Partheniades-Krone (Partheniades, 1962 e Krone, 1962) em que a tensão de cisalhamento de fundo ocupa papel principal na determinação da sedimentação das partículas em suspensão ou da erosão do material de fundo. A deposição ocorre quando a tensão de cisalhamento estiver abaixo de um valor crítico, enquanto que a erosão ocorre quando a tensão de cisalhamento estiver acima de um determinado valor crítico. Os sedimentos podem ser removidos da água por aterramento, ou pode ser remobilizado para dentro da água por desateramento (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

Sedimentos mistos com fração de argila maior que 10% apresentam propriedades coesivas, em que forças eletrostáticas, comparáveis ou maiores que as forças gravitacionais, interagem entre partículas. Desta forma, os sedimentos coesivos não se comportam como partículas individuais, tendendo a se aglomerar e formar flocos cujas velocidades de deposição (ou queda) são maiores que de partículas individuais (Van Rijn, 1993).

#### **3.4.2 Sedimentos não coesivos**

Partículas não coesivas têm tamanho da ordem de 100µm ou maiores (areia). Tais partículas variam em tamanho, forma, gravidade específica e composição mineral, sendo compostas predominantemente de quartzo (Van Rijn, 1993). O comportamento do

transporte de sedimentos arenosos tem grande importância para problemas de engenharia costeira relacionados a alterações morfológicas.

Usualmente, distinguem-se três formas de movimento de partículas: por rolamento, por salto ou movimento por suspensão. Quando o valor da velocidade de cisalhamento de fundo excede um valor crítico inicia-se o movimento das partículas de fundo por escorregamento ou rolamento em contínuo contato com o solo. Com o aumento da velocidade de cisalhamento de fundo as partículas passam a se movimentar através de saltos regulares. Quando o valor da velocidade de cisalhamento de fundo começa a exceder a velocidade de queda das partículas, as partículas de sedimentos podem ser elevadas a um nível em que as forças turbulentas desempenham mesma ordem de grandeza ou maiores que o peso submerso das partículas, resultando em movimento em suspensão (Van Rijn, 1993).

### 3.5 Modelagem do Transporte de sedimentos não coesivos

A taxa de transporte de fundo dos sedimentos não coesivos (todos os tipos de areia) no Delft3D-WAQ é determinada apenas pela condição de fluxo instantâneo local, ou seja, reduzidas escalas de tempo e espaço. Visto que estes sedimentos não estão relacionados com o campo de fluxo, não se considera dispersão ou difusão.

A implementação deste processo baseada na formulação de Engelund-Hansen é descrita como (WL | Delft Hydraulics, 2007b):

$$f_{AREIA} = \frac{f_{C_{AREIA}} u_*^3 u^2}{d_{50} g^2 \Delta r^2}$$

$$\Delta r = \frac{r_{areia} - r_{fluido}}{r_{fluido}}$$

Eq. 21

Onde:

$f_{AREIA}$	Transporte de sedimento não coesivo	$m^2.s^{-1}$
$f_{C_{AREIA}}$	Coefficiente empírico (valor típico = 0.05)	-
$u_*$	Velocidade de cisalhamento de fundo	$m.s^{-1}$
$d_{50}$	Diâmetro médio da partícula	m
$r_{areia}$	Densidade do sedimento	$kg.m^{-3}$
$r_{fluido}$	Densidade do fluido	$kg.m^{-3}$
$u$	Velocidade instantânea	$m.s^{-1}$

O balanço de massa para os sedimentos não coesivos é representado como a alteração do nível da camada de fundo:

$$\frac{\Delta z_b}{\Delta t} = -\frac{1}{1-q} \Delta f_{AREIA} \quad \text{Eq. 22}$$

Onde:

$z_b$	Nível da camada de fundo	m
$q$	Porosidade da camada de fundo	-

### 3.6 Modelagem do material particulado em suspensão

Diferentemente dos sedimentos não coesivos, as escalas de tempo e espaço da variação de fluxo para o transporte de sedimentos em suspensão são bem maiores, em decorrência do tempo e espaço de adaptação da concentração do sedimento.

Os balanços de massa para o material particulado em suspensão na coluna de água ( $c_w$ ) e material particulado na camada de fundo ( $c_b$ ) é representado pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta c_w}{\Delta t} &= \text{carga} + \text{transporte} - \text{deposição} + \text{resuspensão} \\ \frac{\Delta c_b}{\Delta t} &= \text{carga} + \text{deposição} - \text{resuspensão} - \text{aterramento} + \text{desaterramento} \end{aligned} \quad \text{Eq. 23}$$

#### 3.6.1 Processo de sedimentação do MPS

A sedimentação das partículas depende de seu tamanho e densidade, além das condições químicas do corpo de água. A formação de flocos depende das propriedades químicas e físicas do sedimento, salinidade e turbulência.

A alta concentração de MPS favorece o processo de floculação e conseqüentemente eleva a velocidade de queda dos flocos, porém na ocorrência de concentração muito elevada (da ordem de vários g/l) as partículas formam um agregado que resulta na redução da velocidade de queda. Em concentrações muito baixas de MPS, o processo de floculação é muito lento, com mínima variação do tamanho do floco na coluna de água, e conseqüentemente da velocidade de queda (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

A turbulência pode afetar a velocidade de queda de maneiras distintas: quando há turbulência, aumenta a probabilidade de colisão entre partículas resultando na formação de flocos densos com alta velocidade de queda; por outro lado, aumentando-se a turbulência resulta em maiores tensões de atrito turbulento que podem ocasionar a quebra dos flocos e diminuição da velocidade de queda (WL | Delft Hydraulics, 2007b).

A modelagem do processo de sedimentação de matéria inorgânica no Delft3D-WAQ é baseada na formulação de Krone (1962). O fluxo de sedimentação depende da velocidade de sedimentação e da probabilidade de sedimentação. A velocidade de sedimentação pode ser fixada ou calculada combinando-se efeitos de salinidade, temperatura e concentração de sedimento a fim de estimar o efeito da floculação (WL | Delft Hydraulics, 2005).

O fluxo de sedimentação pode ser representado por:

$$f_{sed} = P_{sed} (Z_{sed} + V_{sed} c)$$

$$P_{sed} = \max \left( 0, 1 - \frac{t}{t_{sed}^{cr}} \right) \quad \text{Eq. 24}$$

Onde:

$f_{sed}$	Fluxo de sedimentação do material em suspensão	$\text{gm}^2.\text{d}^{-1}$
$P_{sed}$	Probabilidade de sedimentação	-
$Z_{sed}$	Taxa de sedimentação de ordem zero	$\text{gm}^{-2}.\text{d}^{-1}$
$V_{sed}$	Velocidade de queda do material em suspensão	$\text{m}.\text{d}^{-1}$
$c$	Concentração do material em suspensão	$\text{g}.\text{m}^{-3}$
$t$	Tensão de cisalhamento de fundo	$\text{N}.\text{m}^{-2}$
$t_{sed}^{cr}$	Tensão crítica de cisalhamento de fundo para sedimentação	$\text{N}.\text{m}^{-2}$

### 3.6.2 Processo de resuspensão do material particulado

A resuspensão do material de fundo ocorre quando as forças de cisalhamento de fundo excedem a resistência do sedimento de fundo, caracterizada por um valor crítico da tensão de cisalhamento de fundo. A tensão crítica de cisalhamento de fundo depende de diversos fatores tais como a composição química do material de fundo, a distribuição do tamanho das partículas e processos de bioturbação.

A modelagem do processo de resuspensão de matéria inorgânica no Delft3D-WAQ é baseada na formulação de Partheniades (1962). O fluxo de resuspensão de sedimento é limitado à quantidade de sedimento disponível na camada de fundo e considerado nulo quando a profundidade chega próxima a zero. A probabilidade de resuspensão do sedimento depende da tensão de cisalhamento de fundo em relação à tensão crítica de cisalhamento de fundo (WL | Delft Hydraulics, 2005):

$$f_{res} = P_{res} \left( Z_{res} + \frac{V_{res} MI}{A} \right) \quad \text{Eq. 25}$$

$$P_{res} = \max\left(0, \frac{t}{t_{res}^{cr}} - 1\right)$$

Onde:

$f_{res}$	Fluxo de resuspensão de matéria inorgânica;	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
$P_{res}$	Probabilidade de resuspensão da camada de fundo de Partheniades $<0, \infty>$	-
$Z_{res}$	Fluxo de resuspensão de ordem zero	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
$V_{res}$	Taxa de resuspensão de primeira ordem	$\text{d}^{-1}$
$MI$	Quantidade de sedimento no fundo (matéria inorgânica)	$\text{g}$
$t$	Tensão de cisalhamento de fundo	$\text{N.m}^{-2}$
$t_{res}^{cr}$	Tensão crítica de cisalhamento de fundo para resuspensão	$\text{N.m}^{-2}$
$A$	Área do segmento (ou célula)	$\text{m}^2$

No Delft3D-WAQ é possível optar por utilizar camada de sedimento de fundo variável ou fixa. No caso de camada variável, o fluxo erosivo é limitado baseado na espessura das camadas de sedimento, e no caso de camada fixa, o fluxo erosivo é considerado ilimitado.

### 3.6.3 Tensão de cisalhamento de fundo total

A tensão de cisalhamento de fundo tem influência direta nos processos de sedimentação e erosão. A tensão de cisalhamento de fundo total ( $t$ ) pode ser representada por três parcelas: uma parcela decorrente do fluxo hidrodinâmico ( $t_{fluxo}$ ), uma decorrente de ondas de superfície geradas pelo vento ( $t_w$ ) e outra decorrente da movimentação de navios e de atividades pesqueiras ( $t_{ship}$ ), tal que:

$$t = t_{fluxo} + t_w + t_{ship} \quad \text{Eq. 26}$$

Onde:

$t$	Tensão de cisalhamento de fundo total	$\text{N.m}^{-2}$
$t_{fluxo}$	Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de fluxos hidrodinâmicos	$\text{N.m}^{-2}$
$t_w$	Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de ondas de superfície	$\text{N.m}^{-2}$
$t_{ship}$	Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de movimentação de embarcações	$\text{N.m}^{-2}$

### 3.6.3.1 Tensão de cisalhamento de fundo decorrente de fluxos hidrodinâmicos

O efeito das forças hidrodinâmicas no sedimento se dá através da fricção exercida na tensão de cisalhamento de fundo decorrente de fluxos hidrodinâmicos. Para o caso bidimensional é descrita por:

$$t_{fluxo} = \frac{rg}{C_{2D}^2} \bar{u}^2$$

Eq. 27

ou

$$t_{fluxo} = ru_*^2$$

Onde:

$C_{2D}$	Coeficiente de Chèzy bidimensional	$m^{1/2}s^{-1}$
$\bar{u}$	Velocidade horizontal média ao longo da coluna de água	$m.s^{-1}$
$u_*$	Velocidade de atrito de fundo	$m.s^{-1}$

O coeficiente de Chèzy pode ser obtido através da formulação de Manning ou através da formulação de White Colebrook:

$$C_{2D} = \frac{\sqrt[6]{H}}{n} \quad (Manning)$$

Eq. 28

$$C_{2D} = 18 \log_{10} \left( \frac{12H}{k_s} \right) \quad (White\ Colebrook)$$

Onde:

$H$	Profundidade total da coluna de água	$m$
$n$	Coeficiente de Manning (valor típico 0.02)	$m^{-1/3}.s$
$k_s$	Rugosidade geométrica equivalente de Nikuradse (valores típicos entre 0.15 e 0.01 m)	$m$

Os cálculos de tensão de cisalhamento de fundo para modelos tridimensionais foram inseridos no apêndice B. No presente trabalho não foram consideradas as parcelas de cisalhamento de fundo decorrente de ondas de superfície e de movimentações de embarcações. Os cálculos das tensões de cisalhamento decorrente de ondas de superfície foram inseridos no apêndice C.

## 3.7 Estudos de modelagem previamente realizados

Alguns estudos com aplicações de modelagem numérica na Baía de Paranaguá foram anteriormente realizados. Marone&Jamiyanaa (1997) aplicaram um modelo numérico de contornos variáveis a fim de estudar a dinâmica das marés na Baía de Paranaguá, utilizando o componente de maré M2 como principal forçante. Verificaram

que a onda de maré se propaga como uma onda progressiva de Kelvin na entrada de Paranaguá, tornando-se uma onda mista entre Paranaguá e a entrada da Baía de Antonina.

Em trabalho de fundamental importância de modelagem numérica aplicada à Baía de Paranaguá, Camargo (1998), para estudo do escoamento atmosférico e da circulação oceânica na Baía de Paranaguá, implementou um modelo atmosférico de meso-escala com uso do RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) acoplado a um modelo numérico hidrodinâmico com uso do POM (Princeton Ocean Model) aplicado ao CEP e parte da plataforma continental interna.

Herrling (2003) aplicou uma grade numérica com resolução entre 70 e 240 metros para o CEP, implementou e calibrou um modelo bidimensional com uso do Delft3D-FLOW para simulação hidrodinâmica com uso de marés astronômicas (constituintes astronômicas baseadas em Camargo, 1998) e campo de ventos como forçantes, e analisou o efeito de diferentes parâmetros numéricos e físicos em sua hidrodinâmica.

Ribas (2004) aplicou um modelo tridimensional com uso do Delft3D-FLOW para as baías de Antonina e Paranaguá para estudo do padrão hidrodinâmico da região avaliando o efeito baroclínico na circulação. Em seu estudo não encontrou diferenças significativas dos campos de temperatura e salinidade nas camadas de superfície, meio e fundo, sugerindo que, para os dados de novembro e dezembro de 2000, o sistema apresentou boa capacidade de mistura.

Hayatiningsih (2006) validou e aplicou um modelo tridimensional e comparou com o modelo bidimensional de Herrling (2003), tornando-o mais refinado e com uso de nesting a fim de limitar a área de estudo para a Baía de Paranaguá propriamente dita. Verificou que o modelo tridimensional captou as variações de velocidade e distribuições de salinidade nas escalas horizontais e verticais de forma satisfatória.

Dietrich (2008) aplicou um modelo morfodinâmico à Baía de Paranaguá com o Delft3D-FLOW tendo como base o modelo hidrodinâmico desenvolvido no trabalho de Herrling (2003) a fim de obter um modelo que futuramente pudesse servir de ferramenta para otimização de atividades de dragagem.

Boldrini *et al.* (2008) aplicaram modelos numéricos hidrodinâmicos para a Baía de Paranaguá para determinar regiões de baixa energia cinética no interior da baía, mais propícias para o descarte de material de dragagem. Simularam o descarte de material dragado em pontos específicos, verificando a abrangência das plumas de sedimento e analisaram a formação de ilhas artificiais após descarte para avaliação de impacto.

Com relação a aplicações com uso de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água, Monteiro *et al.* (1999) utiliza o Delft3D-WAQ para investigar se o acúmulo de cobre na margem oeste da Baía de Saldanha, Cidade do Cabo (África do Sul), se origina a partir de uma descarga localizada em um ponto relativamente distante desta área, verificando a grande importância da deposição e acumulação de matéria orgânica no destino de metais traço tóxicos nos sedimentos a longo prazo através dos processos de adsorção, floculação e sedimentação.

Pereira *et al.* (2004) aplica um modelo de qualidade da água com uso do software Delft3D para avaliar o material em suspensão e o oxigênio dissolvido na Lagoa dos Patos, RS. Cunha *et al.* (2006) aplicam um modelo de qualidade da água acoplado a um modelo hidrodinâmico com uso do software SisBahia® para simular a concentração de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio na Baía de Sepetiba (Rio de Janeiro, RJ).



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como primeira abordagem, objetivou-se aplicar o modelo hidrodinâmico bidimensional de Herrling (2003) validado para os dados de 2000, calibrá-lo e validá-lo para os dados da campanha de setembro de 2007, para em seguida aplicar os modelos de qualidade de água com o Delft3D-WAQ.

Embora o ideal para a Baía de Paranaguá seja um modelo tridimensional em decorrência da presença de estratificação, optou-se por utilizar inicialmente o modelo bidimensional. Esta opção justifica-se pela maior simplicidade e economia de tempo computacional, além de que os dados utilizados para calibração e validação serão referentes a setembro de 2007, período marcado por baixa precipitação, e consequentemente predominância da forçante de maré sobre a descarga fluvial.

As medições com CTD da figura 9 representam baixa estratificação vertical da coluna de água, o que torna apropriado o uso de um modelo bidimensional integrado na vertical (2DH) aplicado ao período de estudo.

Uma das propriedades dos sedimentos finos é a formação de flocos por agregação, e posteriormente deposição. O processo de deposição do material em suspensão é influenciado pela concentração, características físicas e químicas do MPS, salinidade e turbulência (WL | Delft Hydraulics, 2007b). Portanto, no módulo hidrodinâmico também será simulado o transporte de sal na Baía de Paranaguá.

### 4.1 Dados

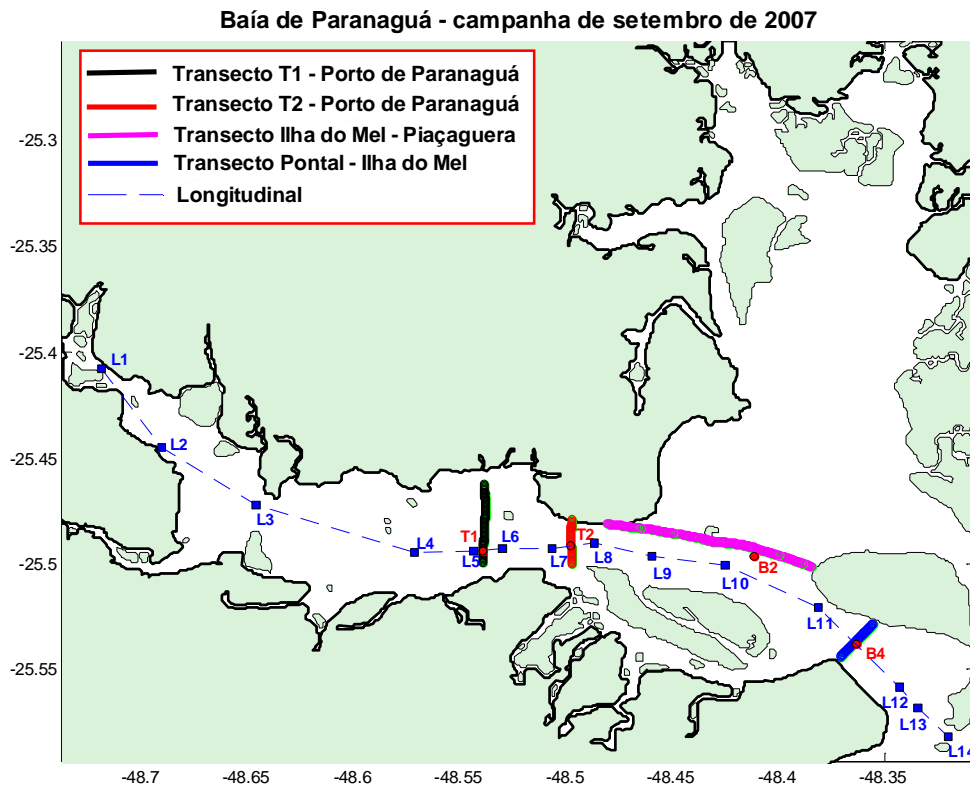
#### 4.1.1 Campanha de coleta de dados

Em setembro de 2007 foi realizada uma coleta de dados oceanográficos no período de duas semanas compreendendo, portanto, ciclos de maré de sizígia e quadratura. Foram realizadas medições com uso dos seguintes equipamentos:

- CTD (Sea&Sun Technology – CTD44 e Seabird Eletronics – d Seabird SBE37) à utilizado no transecto longitudinal da Baía de Paranaguá e transectos do Porto de Paranaguá (pontos T1 e T2)
- S4 (Interocean Systems, Inc) à utilizado no transecto entre Ponta do Poço e Ilha do Mel (ponto B4)
- ADCP (Teledyne RD Instruments e SonTek/YSI) à Foram realizados dois transectos na região próxima ao Porto de Paranaguá (T1 e T2), um transecto entre a Ponta do Poço e Ilha do Mel (ponto intermediário B4) e outro transecto entre Ilha do Mel e Piaçaguera (ponto intermediário B2), indicados na figura 7.

- Sensores de pressão → Muito importantes para validação do modelo hidrodinâmico, foram instalados medidores de pressão na Ponta do Félix, no Rio Guaraguaçu e no “Posto do Tião”, no Canal do DNOS em Pontal do Sul, além dos dados de medições de nível provenientes do Porto de Antonina e do Canal da Galheta, indicados na figura 13.
- Garrafas de Niskin → Foram retiradas coletas de água nos rios Nhundiaquara, Faisqueira, Cachoeira, Guaraguaçu, Anhaia e Itiberê a fim de analisar nutrientes e material particulado em suspensão. Também foram coletadas águas próximas à região do Porto de Paranaguá.

A figura 7 apresenta os transectos e sua localização na Baía de Paranaguá.



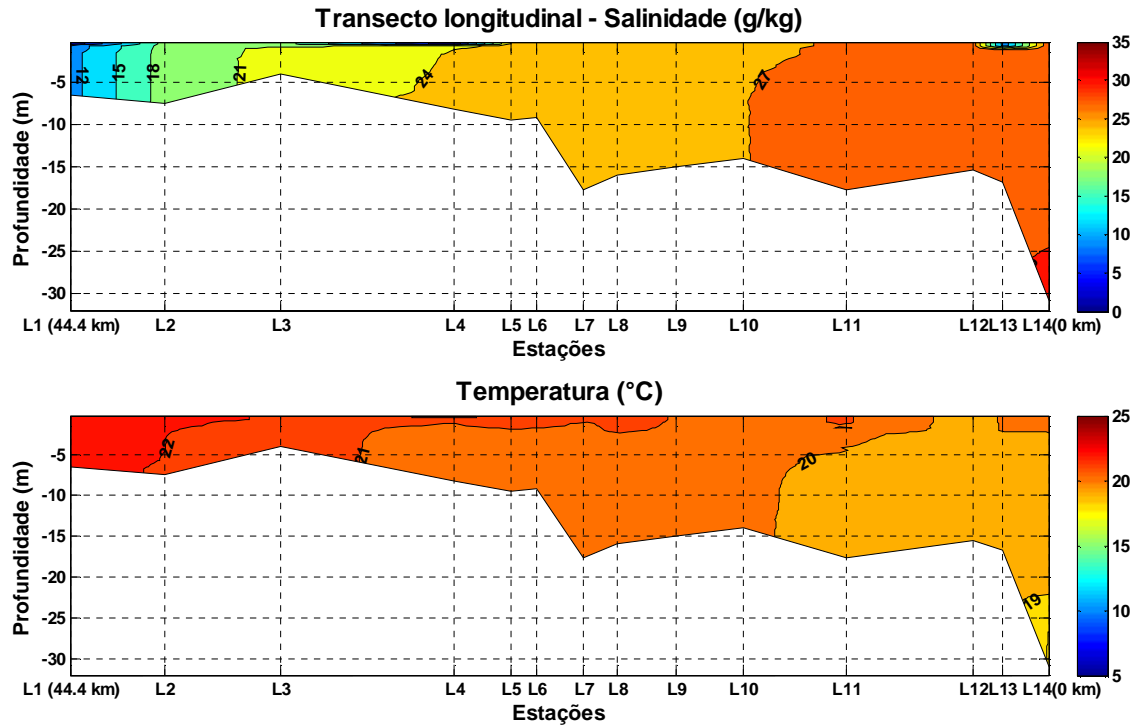
**Fig. 7 – Identificação dos transectos realizados na campanha de coleta de dados na Baía de Paranaguá em setembro de 2007.**

A tabela 7 apresenta a programação das medições realizadas na campanha de setembro de 2007 na Baía de Paranaguá.

Tabela 7 – Programação das medições realizadas na campanha da Baía de Paranaguá de setembro de 2007.

DATA	ATIVIDADES		
04/09/2007	Transecto Pontal – Ilha do Mel – 25 horas	Transecto Ilha do Mel – Piaçaguera – 25 horas	Transectos T1 e T2 (Porto de Paranaguá) – 25 horas
05/09/2007			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADCP</li> <li>• CTD/Ox</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADCP</li> <li>• S4</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADCP</li> <li>• CTD*</li> <li>• S4</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>
06/09/2007			
10/09/2007	Coleta de amostras no Porto de Paranaguá	Coleta de amostras de água na cidade de Paranaguá	Longitudinal (Entre Rio Cachoeira e Ilha do Mel)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CTD</li> <li>• Oxigênio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CTD/Ox</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CTD/Ox</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>
11/09/2007	Transectos T1 e T2 (Porto de Paranaguá) – 25 horas	Transecto Pontal – Ilha do Mel – 25 horas	Transecto Ilha do Mel – Piaçaguera – 25 horas
12/09/2007			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADCP</li> <li>• CTD*</li> <li>• S4</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADCP</li> <li>• CTD/Ox</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADCP</li> <li>• S4</li> <li>• Coletas de água</li> </ul>
13/09/2007	Coleta de sedimentos		

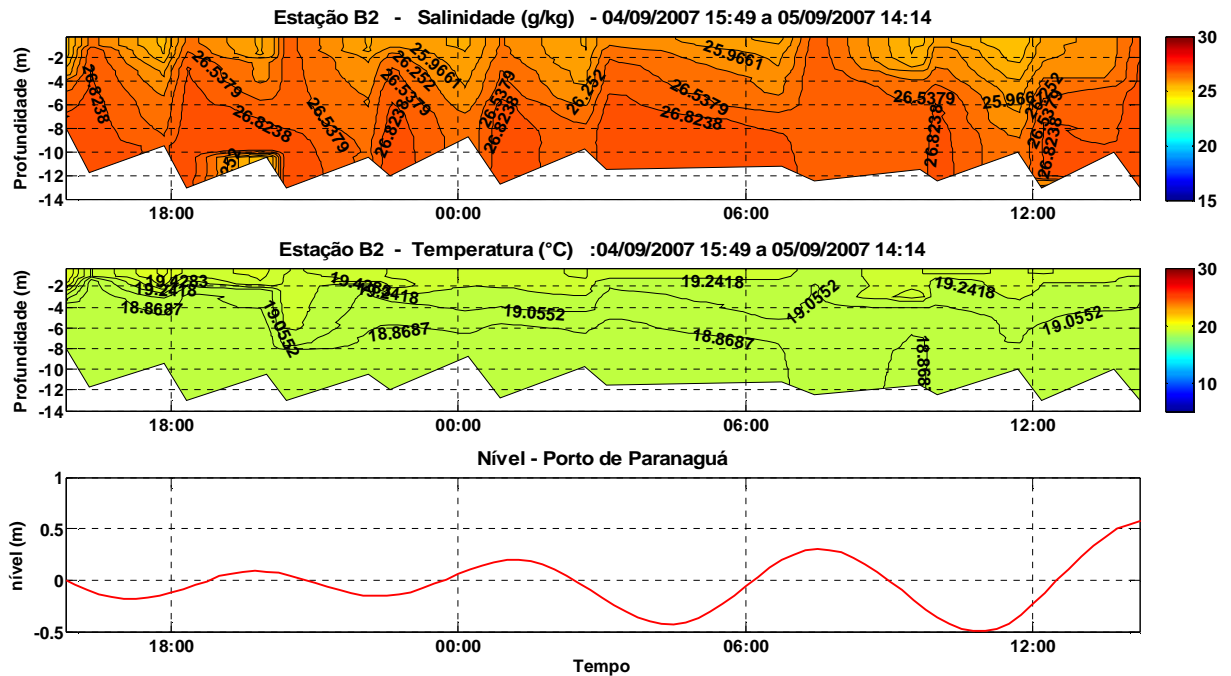
No transecto longitudinal (durante a sizígia) foram realizadas medições com S4 em perfis posicionados nos pontos L1 a L13. Os resultados demonstram baixa estratificação de salinidade e temperatura ao longo da Baía de Paranaguá (figura 8). Os valores de temperatura apresentam pequena variação (19 a 22°C) descendente da cabeceira à desembocadura, e temperatura levemente superior na superfície.



**Fig. 8 – Medições de salinidade e temperatura realizadas no transecto longitudinal no dia 10/09/2007 nas estações L1 a L14.**

Na figura 9 são apresentadas as medições com CTD realizadas na primeira semana de campanha para a estação B2, correspondente à quadratura, em período de quase dois ciclos completos de maré (23 horas). Percebe-se baixa estratificação ao longo da coluna de água, salinidade praticamente homogênea com valores variando entre 25.9 g/kg na superfície e 26.8 g/kg no fundo e temperatura com valores variando entre 18.8 °C no fundo e 19.4 °C na superfície.

As medições referentes aos pontos T1 e T2 foram mais irregulares e escassas, em decorrência de contratempos ocorridos durante a coleta, como períodos noturnos de intensa neblina que impediram a navegabilidade na região em frente ao Porto de Paranaguá.



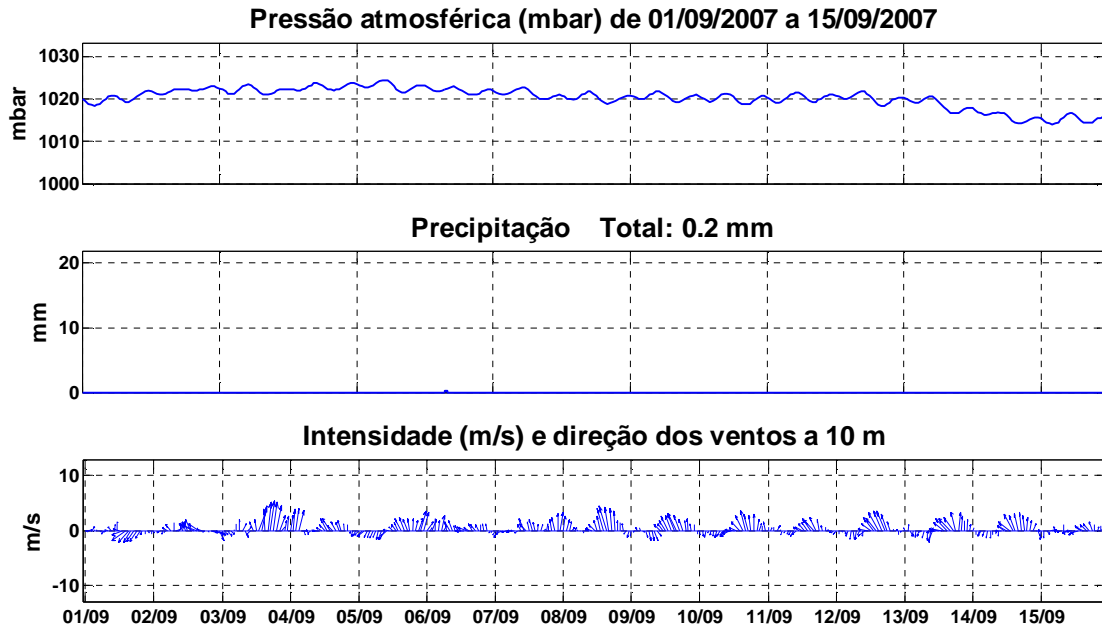
**Fig. 9 –** Medições de salinidade e temperatura realizadas na estação B2 (quadratura). O primeiro gráfico apresenta a salinidade, o segundo gráfico representa a temperatura e o último gráfico representa a variação de nível ao longo da coleta de dados.

#### 4.1.2 Dados meteorológicos

Os dados de temperatura do ar, pressão atmosférica, precipitação e intensidade e direção de ventos medidos na estação meteorológica do CEM na primeira quinzena de setembro de 2007 estão representados na figura 10.

Nota-se que não houve precipitação neste período, situação característica dos meses de inverno nesta região, com conseqüente reduzida descarga fluvial e fraca estratificação na coluna de água. A temperatura do ar na primeira semana foi sensivelmente mais baixa, oscilando entre 15 e 20°C, enquanto que na segunda semana oscilou entre 17 e 23°C, caracterizada por variações diurnas.

A intensidade e direção dos ventos apresentaram variações diurnas, com ventos fracos pela manhã e maiores intensidades no período da tarde. A maioria das ocorrências possui intensidade abaixo de 2 m/s e os ventos com intensidade maiores que 2 m/s são na sua grande maioria provenientes de sudoeste, sul e sudeste. Não houve ocorrência de ventos acima de 7 m/s.



**Fig. 10 – Dados meteorológicos de 1 a 15 de setembro de 2007 da estação meteorológica do CEM. O primeiro gráfico representa a pressão atmosférica, o segundo gráfico representa a precipitação e o último gráfico representa a intensidade e direção dos ventos.**

#### 4.1.3 Dados de maré

Nos contornos abertos da região costeira utilizaram-se dados de marés astronômicas como forçantes. As componentes de maré foram obtidas do trabalho de Herrling (2003), que por sua vez foram adaptadas do trabalho de Camargo (1998).

Para representar o fenômeno das marés no CEP, Camargo (1998) utilizou 12 constituintes astronômicas, sendo quatro diurnas (Q1, O1, P1 e K1), quatro semidiurnas (N2, M2, S2 e K2) uma componente ter-diurna, M3, e três componentes quarterdiurnas (M4, MN4 e MS4). O autor comenta a importância das constituintes ter-diurna e quarterdiurnas na deformação da onda de maré no interior da baía principalmente na quadratura. As 12 constituintes estão apresentadas nas tabelas 11, 12 e 13 no anexo A.

#### 4.1.4 Dados de descarga de rios

Os dados de descarga dos rios foram obtidos através da Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Suderhsa. Foram consideradas as vazões médias diárias dos rios Cachoeira, Nhundiaquara, Sagrado, Nunes, Cacatu e Rio do Pinto para a Baía de Paranaguá e vazões diárias dos rios Guaraqueçaba e Tagaçaba para a Baía de Laranjeiras.

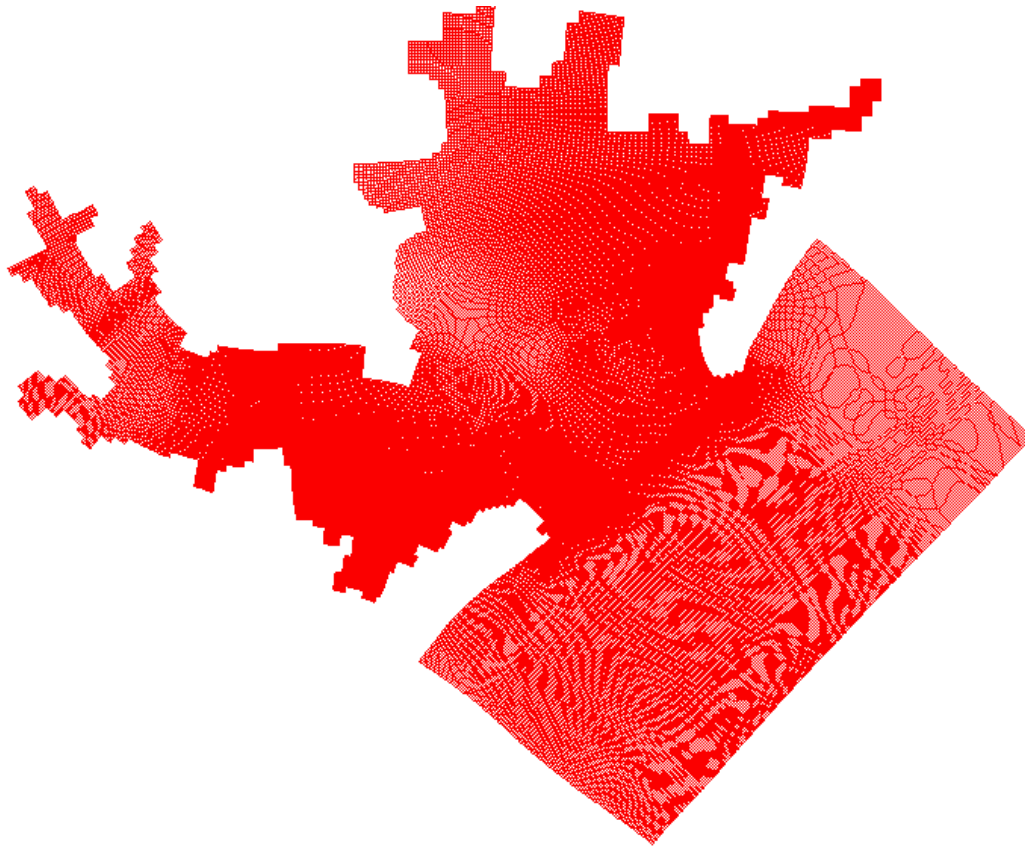
Os valores de vazão utilizados para os contornos abertos dos rios estão representados na tabela 8.

**Tabela 8 – Dados de vazões (em m<sup>3</sup>/s) dos rios utilizados no modelo.**

Período	Rio Guaraqueçaba	Rio Tagaçaba	Rio Cachoeira	Rio Cacatu	Rio Nunes	Rio Nhundiaquara	Rio Sagrado	Rio do Pinto
<b>Semana 1/ agosto</b>	2.54	3.16	16.65	1.23	0.45	1.54	0.57	1.86
<b>Semana 2/ agosto</b>	2.30	2.74	16.29	0.74	0.80	1.47	0.48	1.78
<b>Semana 3/ agosto</b>	2.88	3.57	12.50	1.49	1.84	2.78	0.70	1.94
<b>Semana 4/ agosto</b>	2.40	2.92	18.65	1.39	0.43	1.31	0.50	1.80
<b>1/set</b>	3.68	4.74	21.04	0.76	2.57	5.45	3.22	4.49
<b>2/set</b>	3.29	5.07	47.17	1.59	2.03	8.48	3	3.93
<b>3/set</b>	3.09	4.58	21.05	0.76	0.81	3.8	1.11	2.14
<b>4/set</b>	3	3.35	16.81	3.45	0.64	2.24	0.76	1.95
<b>5/set</b>	2.89	2.95	14.68	4.07	0.6	2	0.6	1.86
<b>6/set</b>	2.78	2.95	15.64	4.34	0.53	1.87	0.53	1.81
<b>7/set</b>	2.62	2.81	9.78	4.25	0.53	1.75	0.5	1.77
<b>8/set</b>	2.55	2.81	9.48	2.76	0.53	1.63	0.53	1.77
<b>9/set</b>	2.47	2.81	10.39	1.35	0.53	1.51	0.46	1.77
<b>10/set</b>	2.39	2.68	8.44	1.17	0.45	1.38	0.48	1.77
<b>11/set</b>	2.34	2.68	9.63	0.4	0.45	1.38	0.46	1.77
<b>12/set</b>	2.34	2.68	17.69	0.4	0.45	1.38	0.5	1.77
<b>13/set</b>	2.29	2.68	18.78	0.32	0.45	1.38	0.48	1.77
<b>14/set</b>	2.27	2.68	20.19	0.35	0.45	1.38	0.46	1.77

#### 4.1.5 Dados batimétricos e grade numérica

Utilizou-se a grade numérica de Herrling (2003) com resolução de 70 a 240 metros. Algumas adaptações para incluir os contornos abertos de descargas dos principais rios foram realizadas. A grade numérica utilizada está representada na figura 11.



**Fig. 11 – Grade numérica do Complexo Estuarino de Paranaguá.**

Os dados batimétricos foram obtidos a partir de fontes distintas. A determinação das linhas de costa, bancos de areia e a extensão das regiões de mangue são baseados nas informações de imagens de satélite (Landsat TM5 e TM7) interpretadas por Noernberg (2001). Grande parte da batimetria é proveniente da digitalização de cartas náuticas e parte proveniente de medições de ecosonda ao longo do canal de navegação fornecida pela Administração dos Portos de Paranaguá em Antonina (APPA). A batimetria do CEP está representada na figura 12.



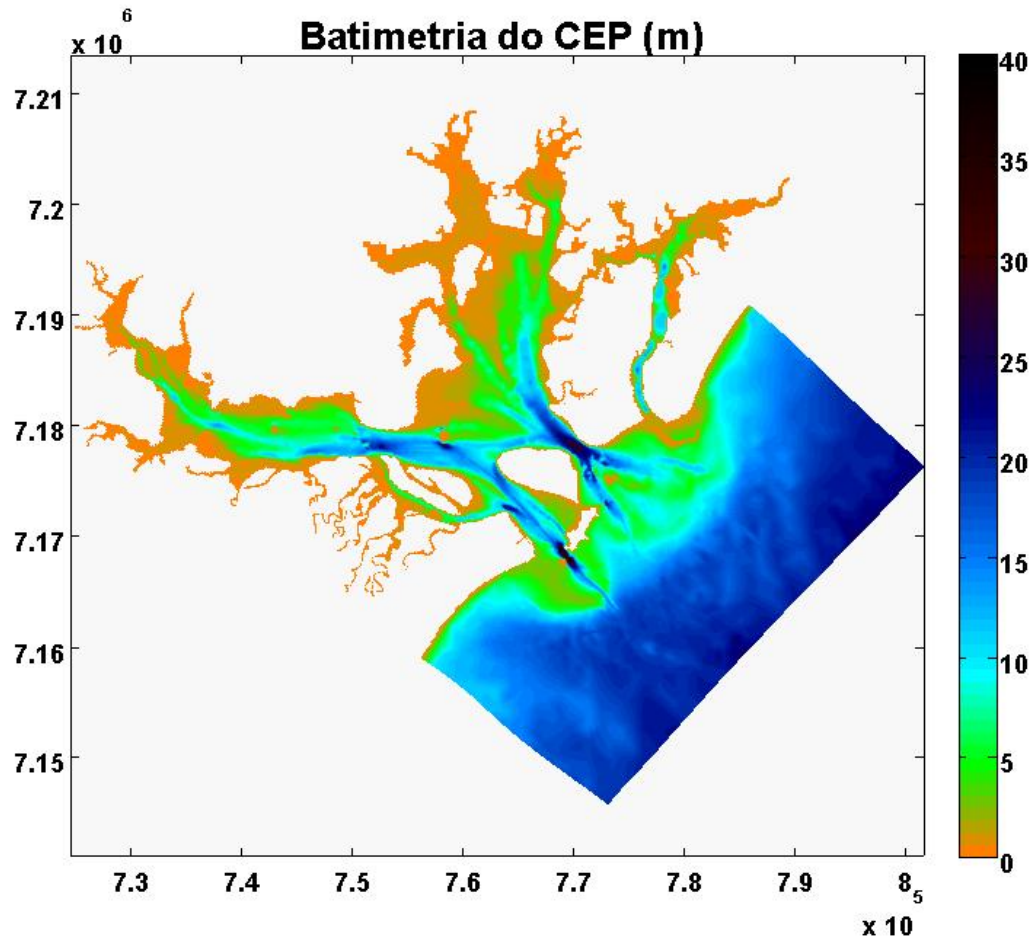


Fig. 12 – Batimetria do Complexo Estuarino de Paranaguá (em metros).

#### 4.2 Validação do modelo hidrodinâmico com Delft3D-FLOW

A prática da modelagem constitui-se basicamente de quatro etapas: concepção do modelo, análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo, executadas nesta ordem e de forma iterativa. Estas etapas podem ser descritas por:

- Concepção do modelo → Definição conceitual do modelo baseado no propósito do modelo, definição da ferramenta numérica utilizada, definição da dimensão do modelo referente às características dos processos físicos a serem estudados, dos dados de entrada necessários (forçantes), definição inicial dos parâmetros numéricos e físicos do modelo.
- Análise de sensibilidade → consiste na verificação da relação entre a saída do modelo e a alteração de determinados parâmetros (numéricos e físicos) de entrada do modelo (SOWA/RIZA, 1999).

- **Calibração** → etapa que objetiva obter um grau de similaridade prévio entre resultados do modelo e dados medições de campo através de variações sistemáticas de parâmetros incertos seguida de análise de erros residuais (SOWA/RIZA, 1999).
- **Validação** → comparação dos dados de saída do modelo com dados independentes de medições de campo (não utilizados na etapa de calibração) a fim de verificar a qualidade do modelo, ou seja, se o modelo é capaz de reproduzir ocorrências passadas com a precisão requerida e se é capaz de responder às questões de interesse (SOWA/RIZA, 1999).

Neste trabalho, utilizou-se a concepção do modelo hidrodinâmico bidimensional integrado na vertical (2DH) utilizado por Herrling (2003) e Osinski (2007), tornando desnecessário executar as etapas de concepção do modelo, análise de sensibilidade e calibração. Justifica-se utilizar um modelo bidimensional em decorrência da baixa estratificação verificada nas medições da campanha (figuras 8 e 9). Foram inseridos os cálculos de salinidade e temperatura vista à importância destes elementos em processos físicos, químicos e biológicos que envolvem qualidade da água. Os parâmetros utilizados para o modelo hidrodinâmico estão representados na tabela 8. Dado que nos trabalhos de Herrling (2003) e Osinski (2007) a calibração e validação foram realizadas baseadas em dados de medições de campo efetuadas em 2000, optou-se por validar o modelo hidrodinâmico para os dados da campanha de setembro de 2007.

**Tabela 9 – Parâmetros do modelo hidrodinâmico.**

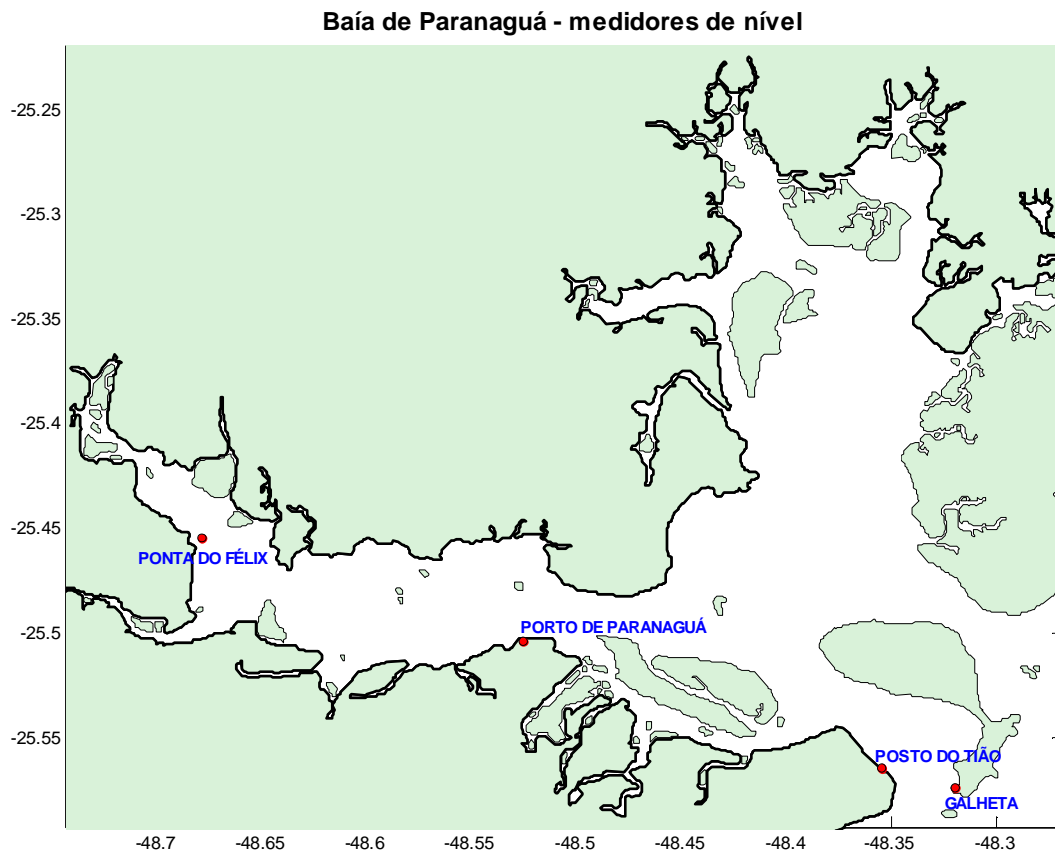
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Passo de tempo</b>	60 s
<b>Aceleração da gravidade</b>	9.81 m/s <sup>2</sup>
<b>Densidade da água</b>	1025 kg/m <sup>3</sup>
<b>Coefficiente de Chézy</b>	90 m <sup>0.5</sup> /s
<b>Coefficiente de viscosidade turbulenta horizontal</b>	0.1 m <sup>2</sup> /s
<b>Coefficiente de difusividade turbulenta horizontal</b>	10 m <sup>2</sup> /s
<b>Salinidade no contorno plataforma continental interna</b>	31 ups
<b>Temperatura no contorno plataforma continental interna</b>	19 °C

O principal parâmetro físico estudado para validação do novo modelo foi o coeficiente de Chézy. Utilizou-se o modelo hidrodinâmico 2D forçado por constituintes astronômicas e descargas fluviais médias dos rios conforme indicado na tabela 7, sem inclusão de campos de ventos e com os processos de salinidade e temperatura ativados. Foram realizadas simulações com diferentes valores de coeficientes de Chézy nos

períodos concomitantes com os períodos de medições de campo a fim de comparar valores de nível e de corrente medidos e simulados.

#### 4.2.1 Comparações de nível

Para validação do modelo hidrodinâmico da Baía de Paranaguá foram considerados medições de nível de quatro localizações: Galheta, Porto de Paranaguá, Ponta do Félix e Posto do Tião, representados na figura 13. Os dados da Galheta e Porto de Paranaguá são provenientes dos postos de medição da APPA e os dados da Ponta do Félix e Posto do Tião são provenientes de medidores de pressão instalados no local no período da campanha.



**Fig. 13 – Estações de medição de nível para comparação com o modelo.**

Para comparação dos valores medidos e simulados escolheu-se o erro denominado raiz quadrado do erro médio quadrático (RMSE), representado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (med - sim)_i^2} \quad \text{Eq. 29}$$

Onde:

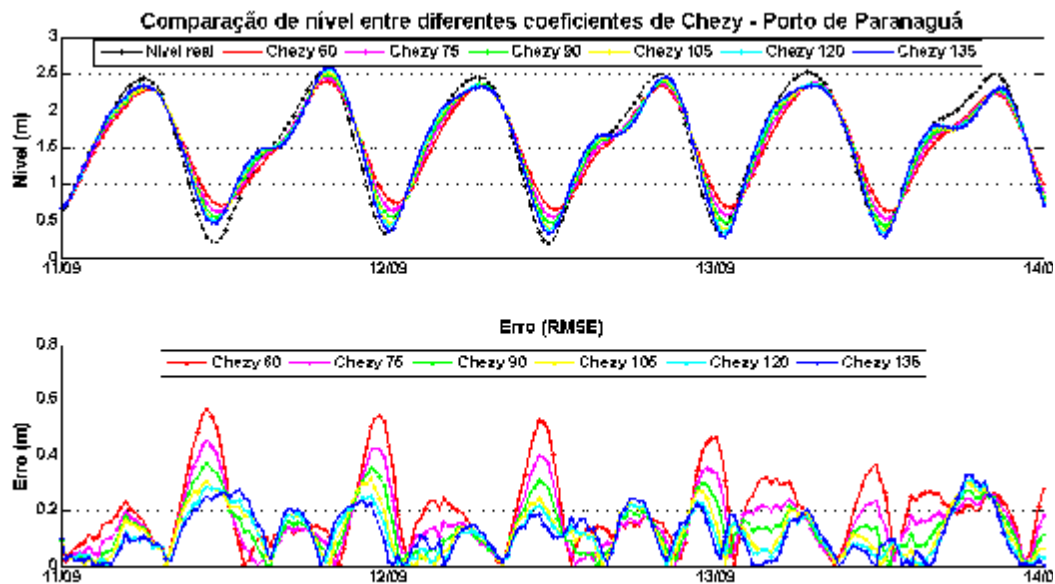
- *med*: Valor medido
- *sim*: Valor simulado

Para verificação do coeficiente de Chèzy, foram realizadas diversas simulações com valores variando entre 45 e 135  $\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  para o período de sizígia, entre 11 e 14 de setembro de 2007. Os valores de nível simulados da Galheta, Porto de Paranaguá e Ponta do Félix foram comparados com os valores reais de nível utilizando-se como referência o erro RMSE, apresentados na tabela 9.

**Tabela 10 – Comparação entre simulações de nível para diferentes coeficientes de Chèzy.**

Coeficiente de Chèzy ( $\text{m}^{0.5}\text{s}^{-1}$ )	RMSE Galheta (m)	RMSE Porto de Paranaguá (m)	RMSE Ponta do Félix (m)
45	0.1456	0.3177	0.3776
60	0.1307	0.2371	0.2610
75	0.1225	0.1874	0.1873
90	0.1182	0.1601	0.1509
105	0.1158	0.1491	0.1471
120	0.1206	0.1379	0.1433
135	0.1209	0.1405	0.1598

A figura 14 mostra a comparação de nível entre valores medidos e simulados do Porto de Paranaguá no período de sizígia para diferentes valores de coeficiente de Chèzy.



**Fig. 14 – Comparações de nível para diferentes coeficientes de Chèzy no período de sizígia (11/09/2007 a 14/09/2007) para o Porto de Paranaguá. O primeiro gráfico representa as**

**variações de nível simulados para diferentes coeficientes de Chèzy comparados com o nível medido, e o segundo gráfico representa o erro RMSE entre o nível medido e os níveis simulados para diferentes coeficientes de Chèzy.**

Verifica-se a partir da comparação da média do RMSE que para valores de nível da Galheta, o uso de um coeficiente de Chèzy de  $105 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  seria mais adequado, enquanto que para valores de nível dos pontos mais internos da baía, Porto de Paranaguá e Ponta do Félix, o coeficiente de Chèzy de  $120 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  apresenta melhores resultados. Este fato pode estar relacionado com a distribuição do sedimento na baía, com areias finas bem selecionadas na zona da boca do estuário, portanto maior rugosidade e menor coeficiente de Chèzy, e predominância de areia fina ou muito fina nos setores medianos da baía, portanto menor rugosidade e maior coeficiente de Chèzy. A partir desta verificação pode-se supor que o ideal seria utilizar um mapa de rugosidade com diferentes coeficientes de Chèzy ao longo da baía para obter melhores resultados.

#### **4.2.2 Comparações de corrente**

Para realizar a comparação de corrente entre valores medidos pelo ADCP nos transectos da campanha e valores simulados, primeiramente foram realizadas simulações a fim de gerar mapas de dados para todas as coordenadas do grid (*map file*) intercalados em 20 minutos, utilizando coeficientes de Chèzy de 90, 105 e  $120 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ .

Com relação aos dados medidos, todos os perfis gerados pelo ADCP em cada transecto foram agrupados de acordo com a coordenada relativa à grade numérica e a seguir obtida a média da suavização dos valores de corrente destes perfis a fim de evitar que *outliers* interfiram demasiadamente no valor a ser comparado. Este resultado foi então comparado com o valor de corrente de saída do modelo na mesma coordenada da grade numérica no período de tempo mais próximo, com erro, portanto de  $\pm 10$  minutos.

No período de quadratura foram comparados valores de medições dos transectos Pontal – Ilha do Mel, Ilha do Mel – Piaçaguera, e dois transectos do Porto de Paranaguá. No período de sizígia foram comparados valores de medições dos transectos Pontal – Ilha do Mel e nos dois transectos do Porto de Paranaguá (figura 7).

##### **4.2.2.1 Semana 1 – quadratura**

O período de quadratura apresentou maiores disparidades nos valores de magnitude e direção de corrente, muito possivelmente explicado pelo acréscimo dos efeitos não lineares durante este ciclo, responsáveis, por exemplo, pelo fenômeno da duplicação das preamares (*double high water*). Os erros gerados por diferenças em cálculos relacionados à batimetria e tensão de cisalhamento de fundo durante o ciclo de quadratura tornam-se mais difíceis de se prever com precisão, além de outros fatores tais

como maior importância de parâmetros de atrito de fundo, e menor confiabilidade das medições de campo realizadas neste período (Wright e Norton, 2000).

A figura 15 exemplifica um transecto entre Ilha do Mel e Piaçaguera da quadratura, indicando magnitude de corrente, direção de corrente, batimetria e nível da coluna de água na Ponta do Félix, respectivamente. No gráfico inferior da figura 15 pode-se constatar a diferença de elevação de nível entre valores medidos e simulados, o que implica em diferenças de fase e consequentemente em maiores erros de magnitude e direção de corrente. Particularmente para o transecto ilustrado, verifica-se que ocorrem inversões da direção de corrente (enchente para vazante) em certos trechos do transecto que o modelo não conseguiu prever.

Esta disparidade entre os níveis medidos e simulados indica que o uso das constituintes astronômicas como forçantes não é adequado no período de quadratura, implicando em diferenças de fase e valores de nível, muito especialmente quando interações não lineares como as que se verificam no CEP produzem componentes de pequeno fundo ou águas rasas com a intensidade e magnitude do caso de Paranaguá, ainda mais evidente nos períodos de quadratura. Os erros de magnitude e direção apresentam-se maiores justamente nos períodos de estofa, com menores magnitudes e inversão de direção de corrente. As ocasiões de baixa magnitude de corrente sofrem maior influência dos componentes não lineares que aumentam estuário adentro.

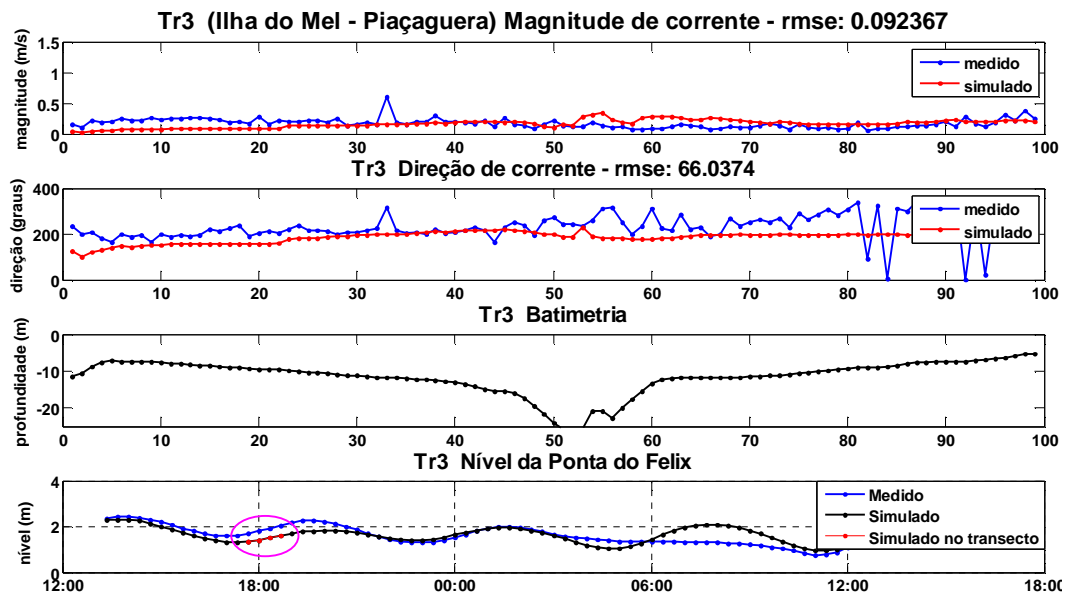
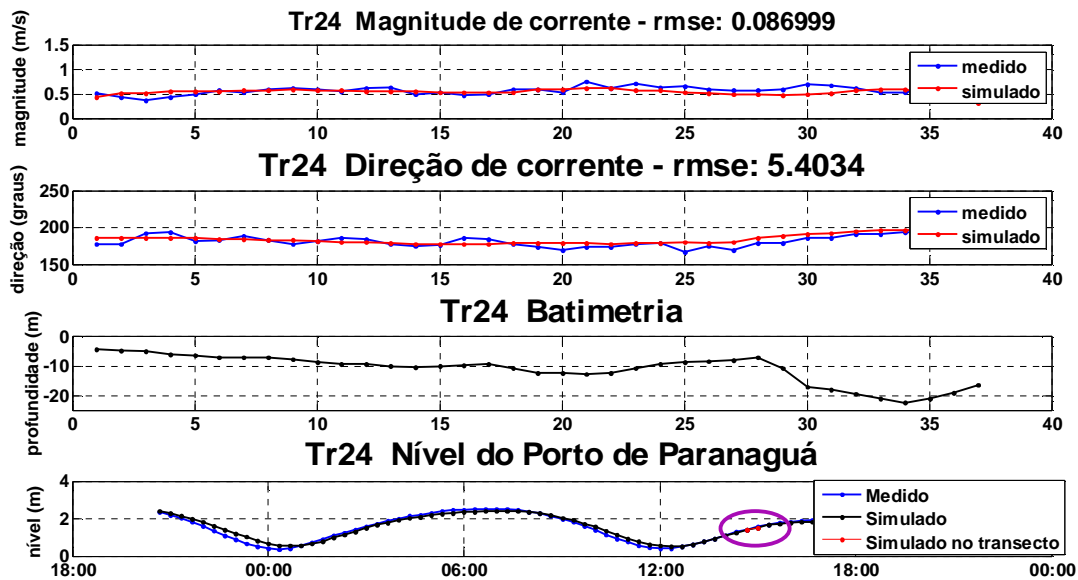


Fig. 15 – Comparações de corrente no transecto Ilha do Mel – Piaçaguera, período de quadratura. Os gráficos representam a magnitude de corrente (m/s), direção (graus), batimetria do transecto realizado e variação de nível (sinalizada por uma elipse).

#### 4.2.2.2 Semana 2 – sizígia

O período de sizígia apresentou melhores resultados nos valores de magnitude e direção de corrente em todos os transectos, visto que as constituintes astronômicas principais de maré são preponderantes.

A figura 16 exemplifica um transecto entre Pontal e Ilha do Mel, indicando magnitude de corrente, direção de corrente, batimetria e nível da coluna de água no Porto de Paranaguá, respectivamente. Os erros para magnitude de corrente e direção de corrente foram para este transecto de 0.08 m/s e 5.4 graus, respectivamente.

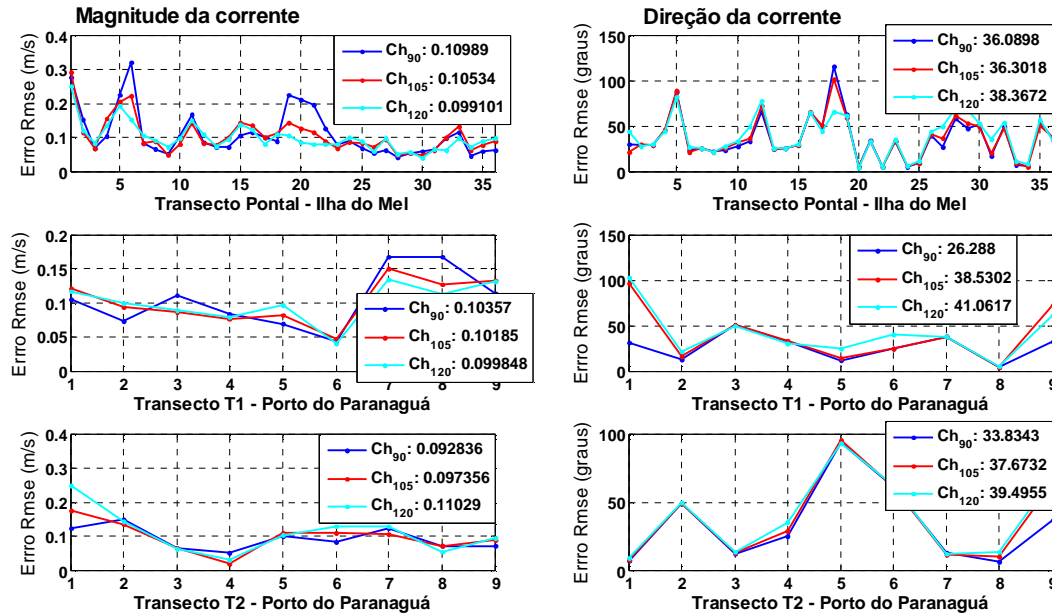


**Fig. 16 – Comparações de corrente no transecto Pontal – Ilha do Mel, período de sizígia. Os gráficos representam a magnitude de corrente (m/s), direção (graus), batimetria do transecto realizado e variação de nível (sinalizada por uma elipse).**

As simulações de correntes para os coeficientes de Chèzy de 90, 105 e 120  $\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  foram comparadas com os valores medidos nos três transectos, como apresentado na figura 17. Verifica-se que o coeficiente de Chèzy de 90  $\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  apresenta melhores resultados para a direção e o coeficiente de Chèzy de 120  $\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  apresenta resultados sensivelmente melhores para a magnitude de corrente. Os erros de magnitude e direção de corrente são da ordem de 0.1 m/s e 36 graus, respectivamente.

Percebem-se erros maiores nos períodos próximos às estofas de maré baixa e alta, próximo às inversões de corrente, e erros menores próximos aos períodos de máximas magnitudes de corrente. O modelo hidrodinâmico 2D considera homogeneidade ao longo da coluna de água, o que acarreta maiores distorções principalmente nos períodos de inversão na presença de estratificação, em que a corrente de fundo tem direção sentido

continente no início da enchente antes da inversão da corrente de superfície, e a corrente de superfície vaza antes que a corrente de fundo (Dyer, 1973).



**Fig. 17 – Comparações de erros de magnitude de corrente (m/s) e direção de corrente (graus) para diferentes coeficientes de Chèzy no período de sizígia para os transectos Pontal – Ilha do Mel, T1 e T2 do Porto de Paranaguá. O eixo das ordenadas representa os erros RMSE e o eixo das abscissas representa os transectos. O quadro de legenda apresenta os erros médios**

Baseado nestes resultados optou-se por utilizar coeficiente de Chèzy de  $90 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ , visto que apresenta resultados sensivelmente melhores na direção de corrente e resultados equiparados aos demais na magnitude de corrente e comparações de nível. Os erros mínimos e máximos (RMSE nos transectos Pontal – Ilha do Mel) para magnitude de corrente foram de 0.04 m/s e 0.32 m/s, respectivamente, enquanto que para direção de corrente foram de 4.5 graus e 115.7 graus. As medianas dos erros médios de todos transectos da magnitude e direção de corrente foram de 0.09 m/s e 29.3 graus, respectivamente.

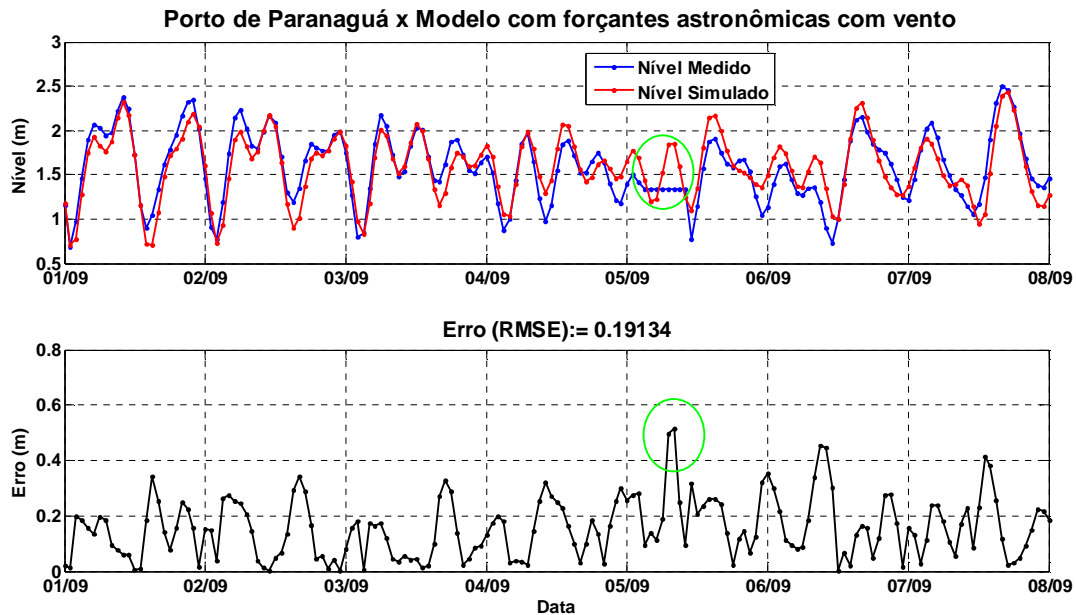
#### 4.2.3 Campos de vento

Os dados de vento provenientes da estação meteorológica do CEM, representados na figura 10, foram incluídos no modelo.

As medições de nível foram comparadas com os valores simulados com e sem inclusão de vento para os períodos de quadratura e sizígia. As comparações dos valores

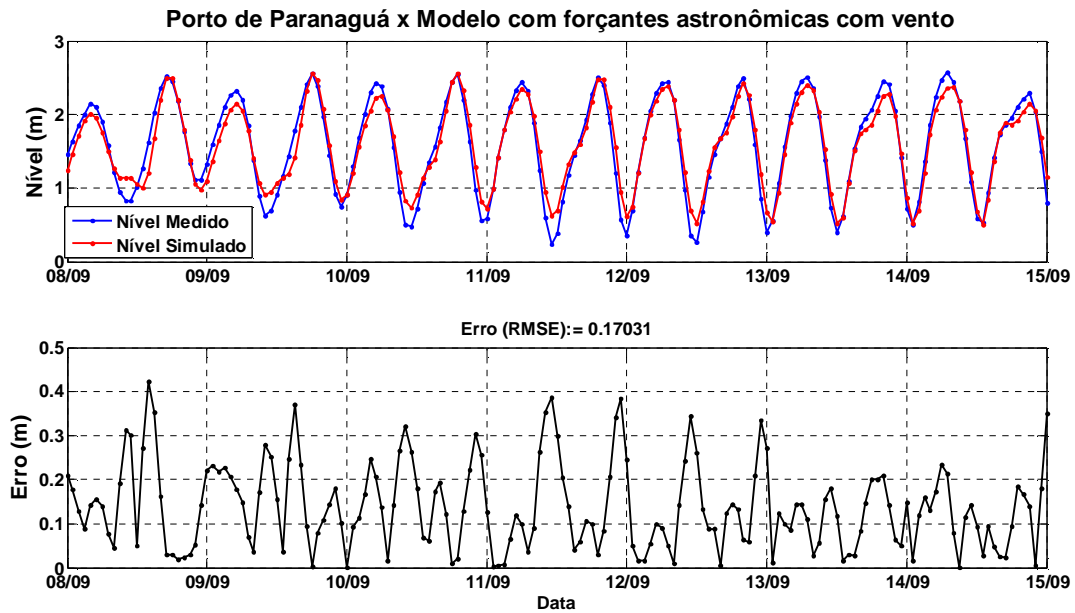


simulados e medidos para o modelo forçado por constituintes astronômicas com vento do Porto de Paranaguá, para o período de quadratura (01 a 07 de setembro) e para o período de sizígia (08 a 14 de setembro), estão representadas nas figuras 18 e 19, respectivamente.



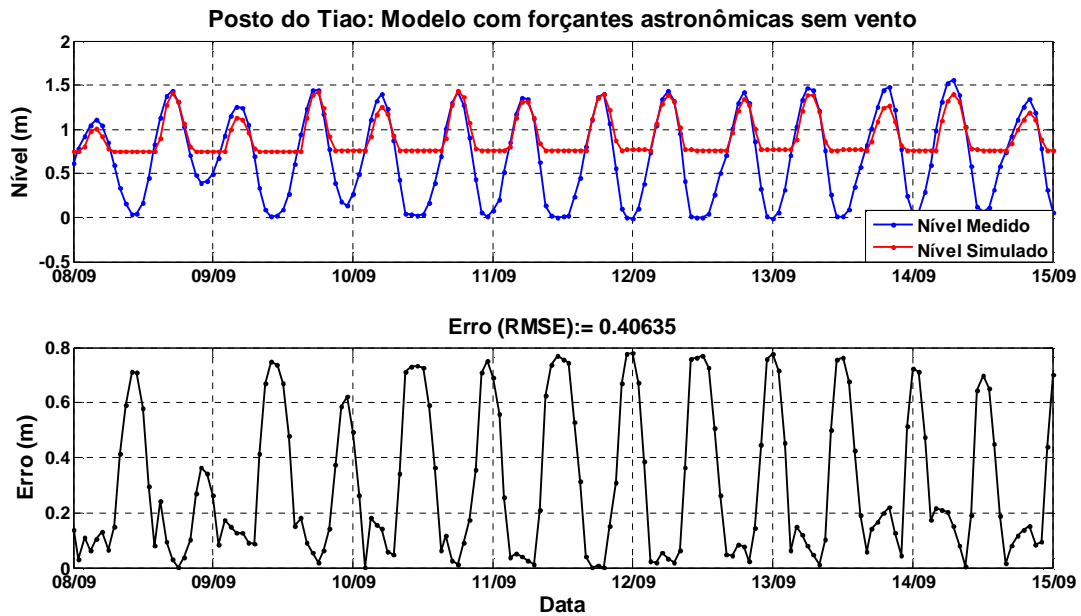
**Fig. 18 – Comparação entre nível do Porto de Paranaguá e modelo forçado por constituintes astronômicas com vento na sizígia. O gráfico superior representa as elevações de nível e o gráfico inferior representa o erro entre valores medidos e simulados. A elipse sinaliza a ocorrência de falhas de medições de nível ocorridas no período.**

O período sinalizado no gráfico por uma elipse mostra a ocorrência de valores mais elevados de erro decorrente da ausência de dados de nível provavelmente decorrente de alguma falha ou manutenção do medidor no período compreendido entre 05/09/2007 02:00:00 e 05/09/2007 10:00:00.



**Fig. 19 – Comparação entre nível do Porto de Paranaguá e modelo forçado por constituintes astronômicas com vento na sizígia. O gráfico superior representa as elevações de nível e o gráfico inferior representa o erro entre valores medidos e simulados.**

Para o Posto do Tião, verifica-se que o modelo apresenta um corte nas simulações de nível decorrente de um erro local de batimetria. Desta forma, torna-se difícil fazer comparações de erro quantitativas para este ponto, limitando-se apenas a comparações visuais de variações de tendência e fase das elevações de nível. A figura 20 apresenta as comparações de nível para o Posto do Tião para o período de sizígia. Verifica-se boa concordância de fase entre valores reais e simulados.



**Fig. 20 – Comparação entre nível do Posto do Tiao e modelo forçado por constituintes astronômicas. O gráfico superior representa as elevações de nível e o gráfico inferior representa o erro entre valores medidos e simulados. Os resultados indicam erros locais de batimetria.**

Portanto, a comparação quantitativa de erros será limitada às estações de nível da Galheta, Porto de Paranaguá e Ponta do Félix. O resultado dos erros para as simulações dos três pontos de nível está representado na tabela 10.

**Tabela 11 – Comparação de nível entre simulações com e sem campos de vento.**

Simulação	RMSE Galheta (m)		RMSE Porto de Paranaguá (m)		RMSE Ponta do Félix (m)	
	Quadratura	Sizígia	Quadratura	Sizígia	Quadratura	Sizígia
<b>Forçante astronômica sem vento</b>	<b>0.174</b>	<b>0.126</b>	<b>0.192</b>	<b>0.171</b>	<b>0.241</b>	<b>0.172</b>
<b>Forçante astronômica com vento</b>	<b>0.174</b>	<b>0.126</b>	<b>0.191</b>	<b>0.170</b>	<b>0.241</b>	<b>0.171</b>

Embora o modelo com inclusão de forçantes de vento apresente praticamente nenhuma alteração no resultado, muito provavelmente decorrente da baixa intensidade dos ventos no período da campanha, optou-se por utilizar este modelo, a fim de que na modelagem de temperatura seja considerada nos cálculos a troca de calor na superfície decorrente da influência dos ventos.

### 4.3 Aspectos numéricos do Delft3D-WAQ

Após a simulação hidrodinâmica, é necessário realizar o acoplamento com o modelo de qualidade da água, onde condições hidrodinâmicas tais como elevação de nível, corrente, densidade, salinidade e viscosidade turbulenta são disponibilizadas como informações para o modelo de qualidade da água.

No acoplamento do modelo hidrodinâmico com o de qualidade da água é fornecido o tempo mínimo de residência (numérico), de forma que esquemas numéricos explícitos requerem que o passo de tempo nas simulações de qualidade da água seja menor que este tempo para se evitar erros numéricos e extrapolações. Como o tempo de residência foi abaixo de 12 segundos, a opção foi utilizar um esquema numérico implícito, incondicionalmente estável, porém com alto custo computacional. O passo de tempo utilizado para as simulações de qualidade da água foi de uma hora.

O alto custo computacional foi um grande entrave para o desenvolvimento do trabalho. O servidor co CEM adquirido para utilizar o Delft3D teve problemas técnicos e não pôde ser utilizado, restando então o uso de um computador pessoal comum, com processador Intel Core2 / 1.73 GHz e 2 Gb de RAM. As simulações hidrodinâmicas para o período de uma semana, dependendo da inclusão dos processos de salinidade, temperatura e derivadores, levaram entre 9 e 12 horas. O tempo computacional das simulações de qualidade da água depende do número de processos considerados, tal que para o período de uma semana leva em torno de 38 horas de tempo de simulação apenas para um tipo de sedimento. Alguns testes se tornaram inviáveis, como a inclusão dos processos de floculação e metais traço conjuntamente, que levaram tempos de simulação comparáveis aos tempos reais de análise.

### 4.4 Modelagem de sedimentos

A partir dos dados brutos obtidos e fornecidos por Lamour et al. (2004), com uso do módulo Delft3D-Quickin, foram interpolados utilizando-se o método de interpolação *gridcell averaging* os dados de diâmetro médio do sedimento, percentual de silte e percentual de areia fina e muito fina, apresentados nas figuras 21, 22 e 23, respectivamente.

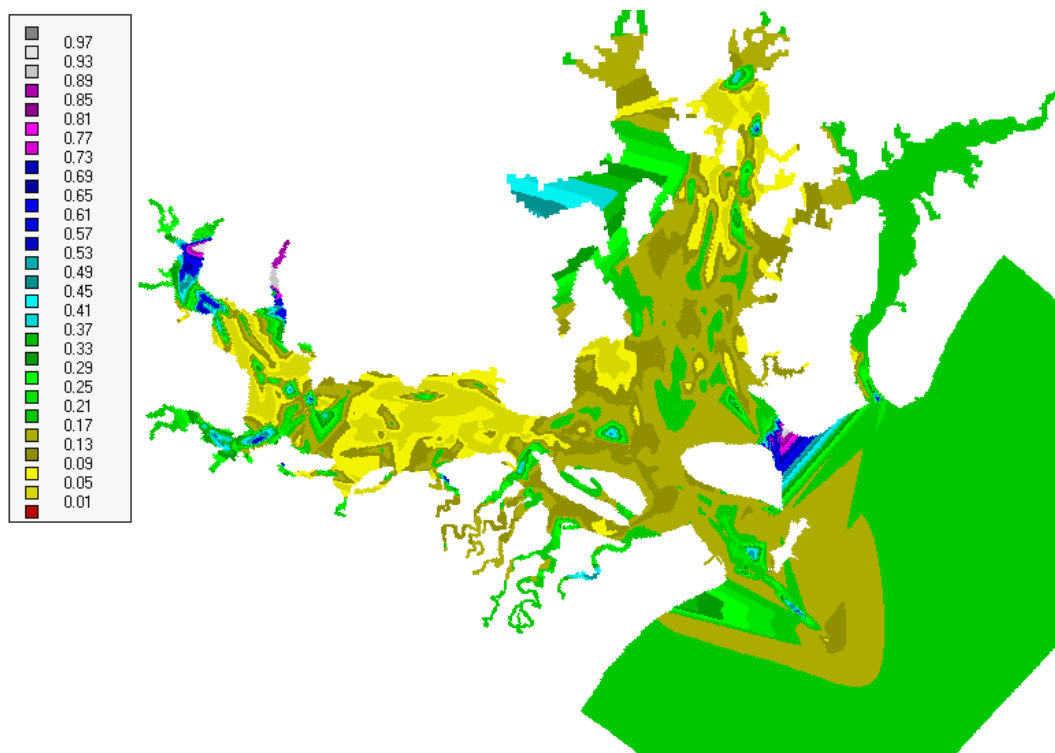


Fig. 21 – Mapa de diâmetro médio dos sedimentos da Baía de Paranaguá (mm)

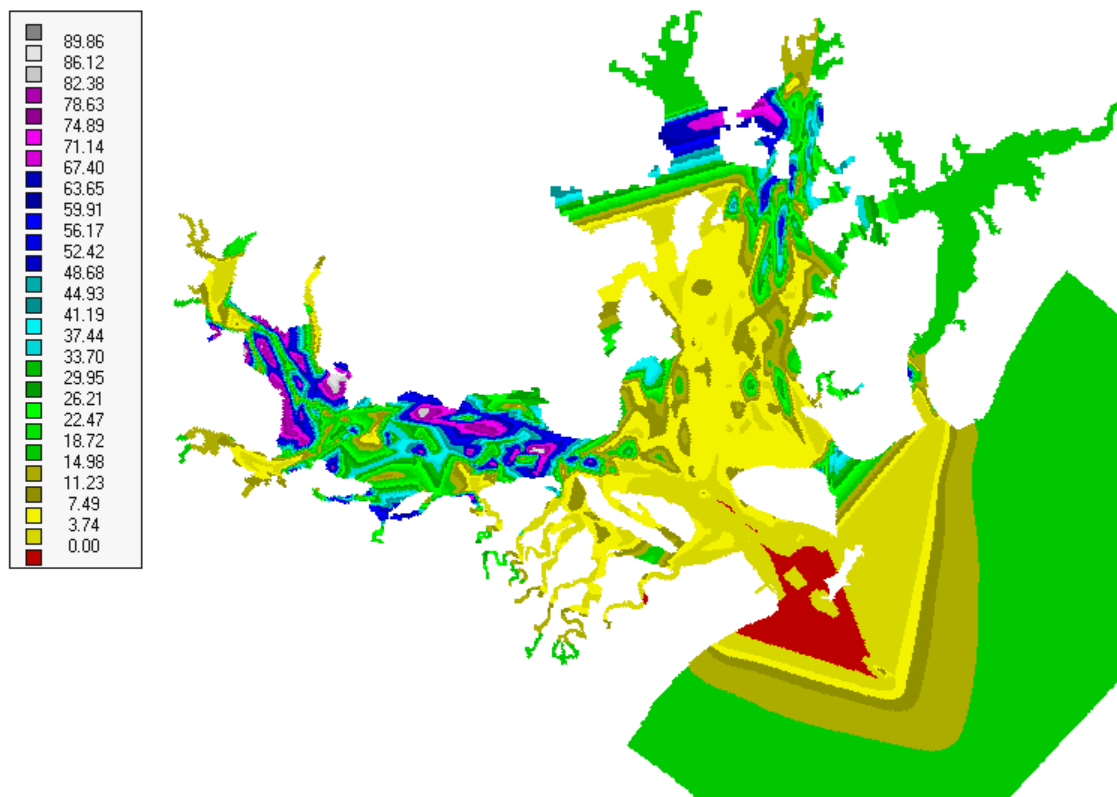
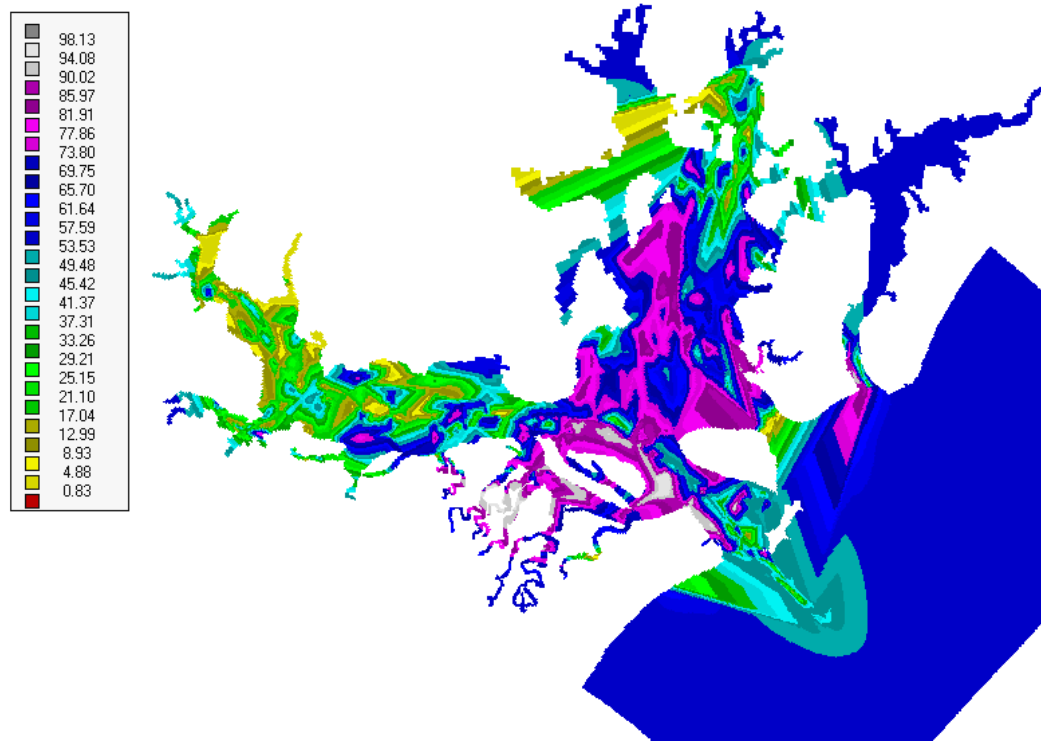


Fig. 22 – Mapa de percentual do total de silte da Baía de Paranaguá.



**Fig. 23 – Mapa de percentual do total de areia fina e muito fina da Baía de Paranaguá**

A partir dos mapas de percentual de silte e percentual de areia fina e muito fina, foram calculados os mapas de massa de silte e areia no fundo a serem utilizados como condições iniciais na modelagem de sedimentos, pela seguinte equação:

$$M = Surf \cdot h \cdot r \cdot Perc \quad \text{Eq. 30}$$

Onde:

M	Massa de sedimento no fundo	Kg
Surf	Área da superfície do segmento	m <sup>2</sup>
h	Altura da camada de sedimento no fundo (valor utilizado: h=1 m)	m
r	Densidade do sedimento ( $r = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$ )	kg.m <sup>-3</sup>
Perc	Percentual do sedimento no fundo	%

O valor escolhido para altura da camada de sedimento de fundo foi escolhido de forma que o volume disponível de sedimentos no fundo na seja grande suficiente para que não haja escassez de sedimentos decorrente dos processos erosivos modelados escala temporal utilizada (duas semanas).

#### 4.4.1 Material particulado em suspensão

Para modelagem do material particulado inorgânico em suspensão, foram considerados dois tipos de sedimentos: silte e areia, sob os processos de sedimentação

e resuspensão. O Delft3D-WAQ computa tanto a concentração em suspensão quanto a massa de material no fundo. A concentração do material particulado na coluna de água decresce com ocorrência de sedimentação e aumenta na ocorrência de resuspensão, e a quantidade de material depositado no fundo se comporta de forma oposta.

O processo de sedimentação é determinado pela formulação de Partheniades-Krone que define uma probabilidade de sedimentação de matéria inorgânica, dependente basicamente da tensão de cisalhamento de fundo (calculada) e da tensão crítica de cisalhamento para sedimentação (parâmetro de entrada). A sedimentação ocorre quando a tensão de cisalhamento de fundo atinge um valor inferior à tensão crítica de cisalhamento de fundo para sedimentação. De uma forma geral, o fluxo de sedimentação é determinado por:

$$F_{sed} = P_{sed} V_{sed} c \quad \text{Eq. 31}$$

Onde:

$F_{sed}$	Fluxo de sedimentação do material em suspensão	$\text{gm}^2.\text{d}^{-1}$
$P_{sed}$	Probabilidade de sedimentação	-
$V_{sed}$	Velocidade de queda do material em suspensão	$\text{m}.\text{d}^{-1}$
$c$	Concentração do material em suspensão	$\text{g}.\text{m}^{-3}$

Portanto, os principais parâmetros para calibração do processo de sedimentação são a tensão crítica de cisalhamento de fundo para sedimentação e a velocidade de sedimentação.

O processo de resuspensão é determinado pela formulação de Partheniades-Krone que define uma probabilidade de resuspensão de matéria inorgânica, dependente basicamente da tensão de cisalhamento de fundo (calculada) e da tensão crítica de cisalhamento para resuspensão (parâmetro de entrada). A resuspensão ocorre quando a tensão de cisalhamento de fundo atinge um valor superior à tensão crítica de cisalhamento de fundo para resuspensão.

O fluxo de resuspensão é proporcional à fração disponível de sedimento presente no fundo, a uma taxa de resuspensão de ordem zero, e à probabilidade de resuspensão. De uma forma geral, o fluxo de resuspensão é determinado por:

$$F_{res} = P_{res} T_{res} \quad \text{Eq. 32}$$

Onde:

$F_{res}$	Fluxo de resuspensão de matéria inorgânica;	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
$P_{res}$	Probabilidade de resuspensão da camada de fundo de Partheniades $<0, \infty>$	-
$T_{res}$	Taxa de resuspensão de ordem zero	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$

Portanto, os principais parâmetros para calibração do processo de resuspensão são a tensão crítica de cisalhamento de fundo para resuspensão e a taxa de resuspensão de ordem zero.

A sugestão de valores de velocidade de sedimentação para silte e argila foram encontrados na literatura, (Xia et al., 2004; Souza et al., 2001; Gerritsen et al., 2000) com valores variados entre  $0.02 \text{ mm.s}^{-1}$  a  $10 \text{ mm.s}^{-1}$ , desde silte fino até areia média/grossa.

Os valores experimentais de tensão crítica de cisalhamento para resuspensão foram variados em torno de valores calculados segundo método de Shields, apresentado nas equações 37, 38 e 39 no capítulo 5. Considerando o diâmetro médio limite entre silte e argila ( $0.125 \text{ mm}$ ), a tensão crítica correspondente é de  $0.15 \text{ N.m}^{-2}$ . Para o diâmetro médio limiar entre areia média e areia fina ( $0.5 \text{ mm}$ ), a tensão crítica correspondente é de  $0.24 \text{ N.m}^{-2}$ .

A tabela 12 apresenta os valores utilizados para os principais parâmetros nos processos de sedimentação e resuspensão para silte e areia.

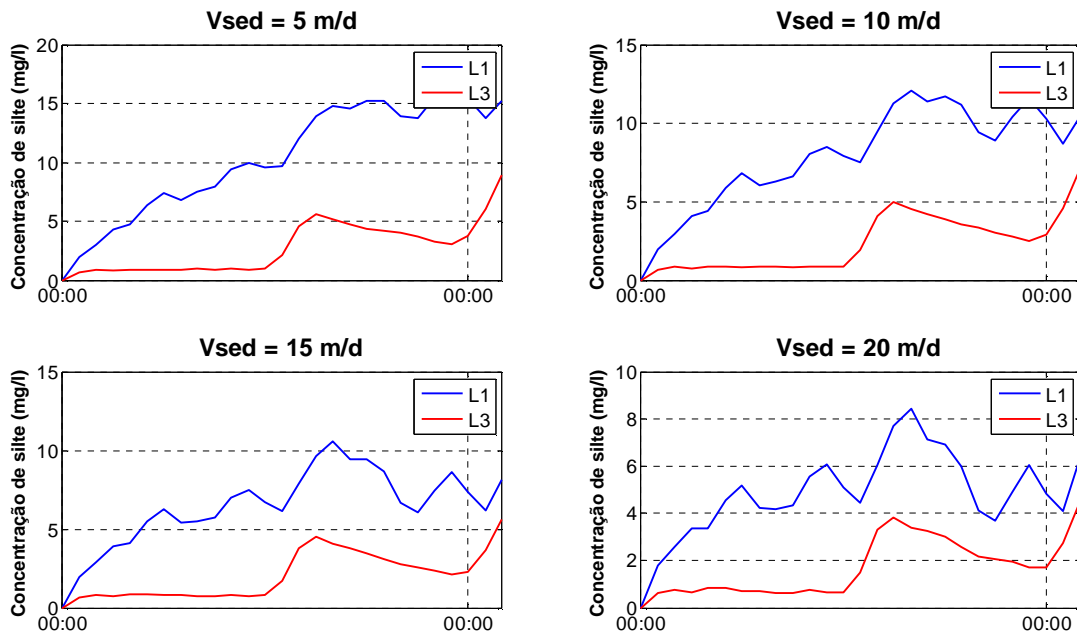
**Tabela 12 – Parâmetros de análise de sensibilidade na modelagem de material particulado em suspensão.**

Parâmetro	Valores de testes para areia	Valores finais para areia	Valores de teste para silte	Valores finais para silte
Velocidade de sedimentação ( $\text{m.d}^{-1}$ )	100 a 500	180	5 a 20	5
Tensão crítica de cisalhamento para sedimentação ( $\text{N.m}^{-2}$ )	0.15 a 0.25	0.17	0.1 a 0.2	0.13
Taxa de resuspensão de ordem zero ( $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )	10 - 100	10	40 - 100	100
Tensão crítica de cisalhamento para resuspensão ( $\text{N.m}^{-2}$ )	0.15 a 0.25	0.18	0.1 a 0.2	0.15

Na análise de sensibilidade da modelagem de silte foram utilizados valores de velocidade de 5, 10, 15 e  $20 \text{ m/d}$ , com taxa de resuspensão de ordem zero de  $100 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ .



$^2.d^{-1}$ ). A comparação destas velocidades em dois ciclos de maré sizígia (25 horas), com concentração inicial nula, sugere que esta escala de tempo é suficiente para se alcançar valores de concentração da ordem de 20 mg/l (conforme gráfico superior direito da figura 24). A concentração final e a escala de tempo necessária para estabilização da concentração são inversamente proporcionais à velocidade de sedimentação. A concentração ainda depende da disponibilidade do sedimento na camada de fundo e da magnitude da tensão de cisalhamento local. A figura 24 apresenta a concentração de silte para os pontos L1 e L3 referentes ao transecto longitudinal (interior da Baía de Antonina) para as quatro velocidades mencionadas no período de 25 horas.

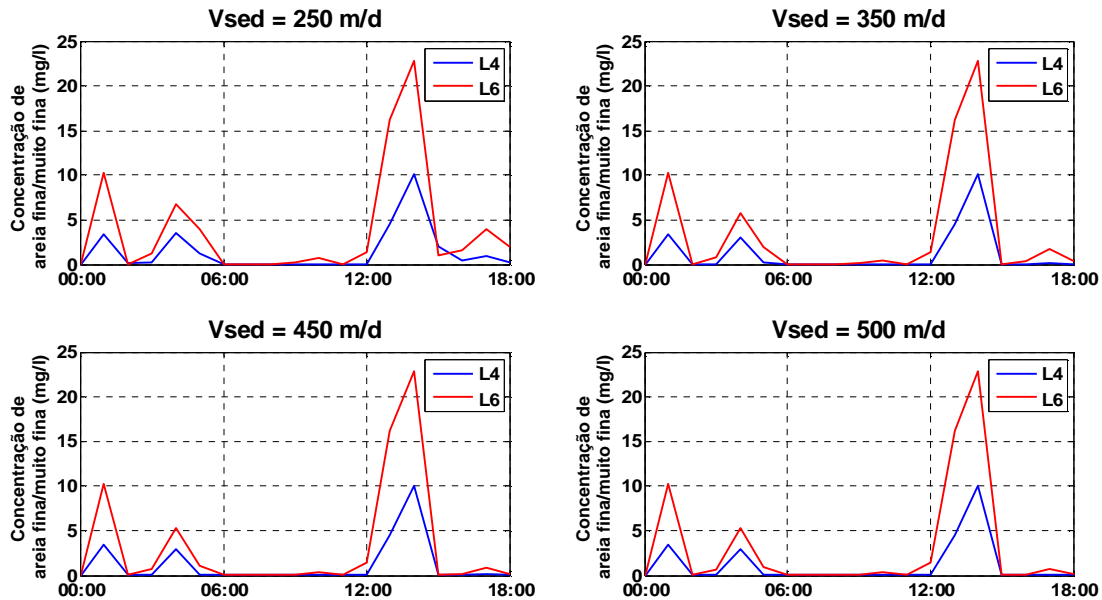


**Fig. 24 – Análise de sensibilidade da modelagem de silte para velocidades de sedimentação de 5, 10, 15 e 20 m/d para os pontos L1 e L3 do transecto longitudinal em um período de um dia de simulação. Velocidades de sedimentação menores resultam em valores de concentração de silte mais elevados, bem como tempos maiores de estabilização da concentração.**

Na análise de sensibilidade da modelagem de areia fina e muito fina foram utilizados valores de velocidade de 250, 350, 450 e 500 m/d, com taxa de resuspensão de ordem zero de  $40 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ). A comparação destas velocidades em um período um pouco mais longo que um ciclo de maré de sizígia (18 horas), com concentração inicial nula, sugere que a escala de tempo determinante na variação da concentração de areia é da ordem de poucas horas. A concentração de areia na coluna de água depende principalmente da tensão de cisalhamento de fundo local e da taxa de resuspensão de sedimento, proporcional à disponibilidade do sedimento na camada de fundo. Desta forma, os picos de concentração de areia serão concomitantes com os períodos de alta magnitude de velocidade e, devido à alta velocidade de sedimentação da areia, em

poucas horas a concentração de areia na coluna de água se reduz a valores muito baixos. Verifica-se ainda pouca diferenciação no comportamento entre as diferentes velocidades de sedimentação em relação ao passo de tempo escolhido na modelagem de sedimentos.

A figura 25 apresenta a concentração de areia fina e areia muito fina para os pontos L4 e L6 referentes ao transecto longitudinal (região em frente ao Porto de Paranaguá) para as quatro velocidades mencionadas no período de 18 horas.



**Fig. 25 – Análise de sensibilidade da modelagem de areia fina/muito fina para velocidades de sedimentação de 250, 350, 450 e 500 m/d para os pontos L4 e L6 do transecto longitudinal em um período de simulação de 18 horas.**

Este mesmo comportamento deve ser esperado de uma pluma de material dragado em leito predominantemente arenoso. Deve-se levar em consideração a velocidade do fluxo desde o início do ato de despejo do material dragado até o seu término a fim de que o sedimento se deposite na região desejada, evitando espalhamento em locais inadequados.

Alguns problemas ocorreram no cálculo das velocidades horizontais no Delft3D-WAQ, especialmente nas regiões próximas aos contornos fechados com alterações abruptas de profundidades. Inicialmente o Delft3D-WAQ calculava valores de velocidades muito altos, o que geravam tensões de cisalhamento muito altas, prejudicando a análise de resuspensão de sedimentos nestas regiões. Após notificação do problema para o suporte, a solução paliativa foi aplicar um filtro de limite de velocidades com média baseado em valores mínimos, e atribuir a massa de sedimento nos locais afetados como

sendo igual a zero. A natureza da modelagem numérica e suas limitações levam a estas manipulações que, mesmo aceitáveis, significam usualmente que os modelos ainda não representam totalmente e de forma acurada alguns elementos da natureza. Conhecida esta limitação, é válido fazer uso destas soluções paliativas.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Hidrodinâmica

Analisando os resultados simulados para as velocidades de fluxo nos máximos de enchente e vazante na sizígia, observam-se valores superiores de corrente na vazante, chegando até 130 cm/s em algumas regiões de confluência, enquanto que para enchente os valores máximos chegam a 90 cm/s. As figuras 26 e 27 mostram as correntes máximas para vazante (12/09/2007 23:00) e enchente (13/09/2007 03:00) na sizígia, respectivamente. As cores indicam os valores de magnitude enquanto que os vetores em preto indicam direção e sentido de corrente.

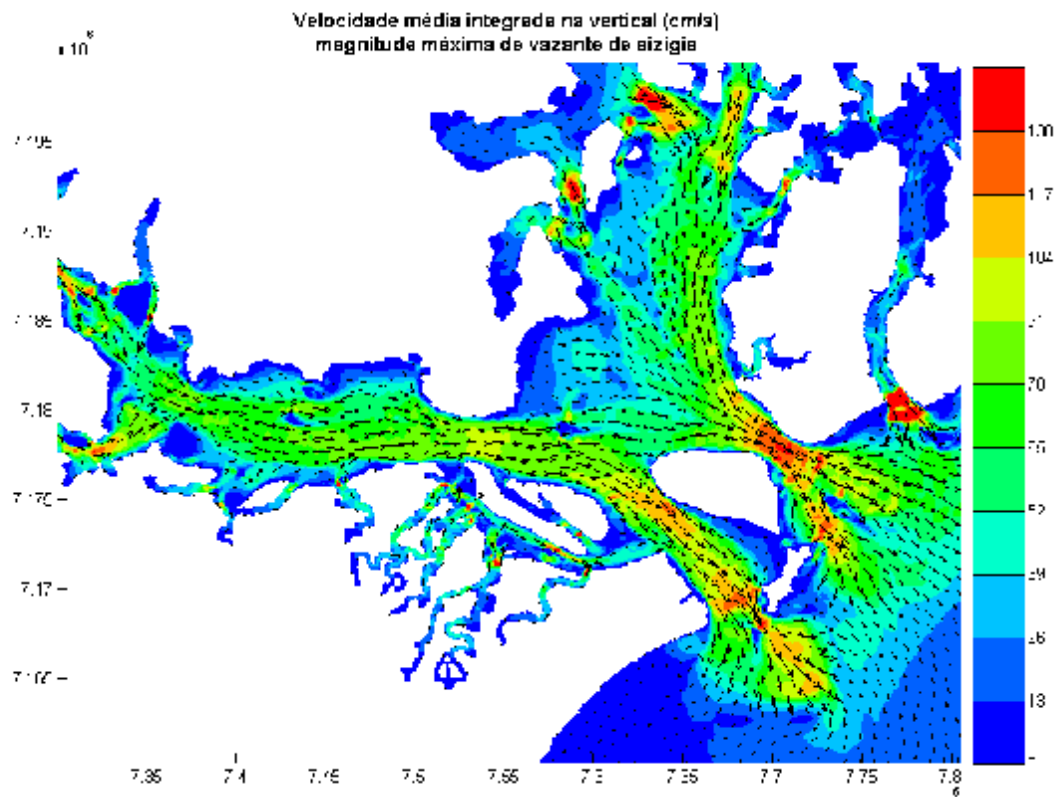
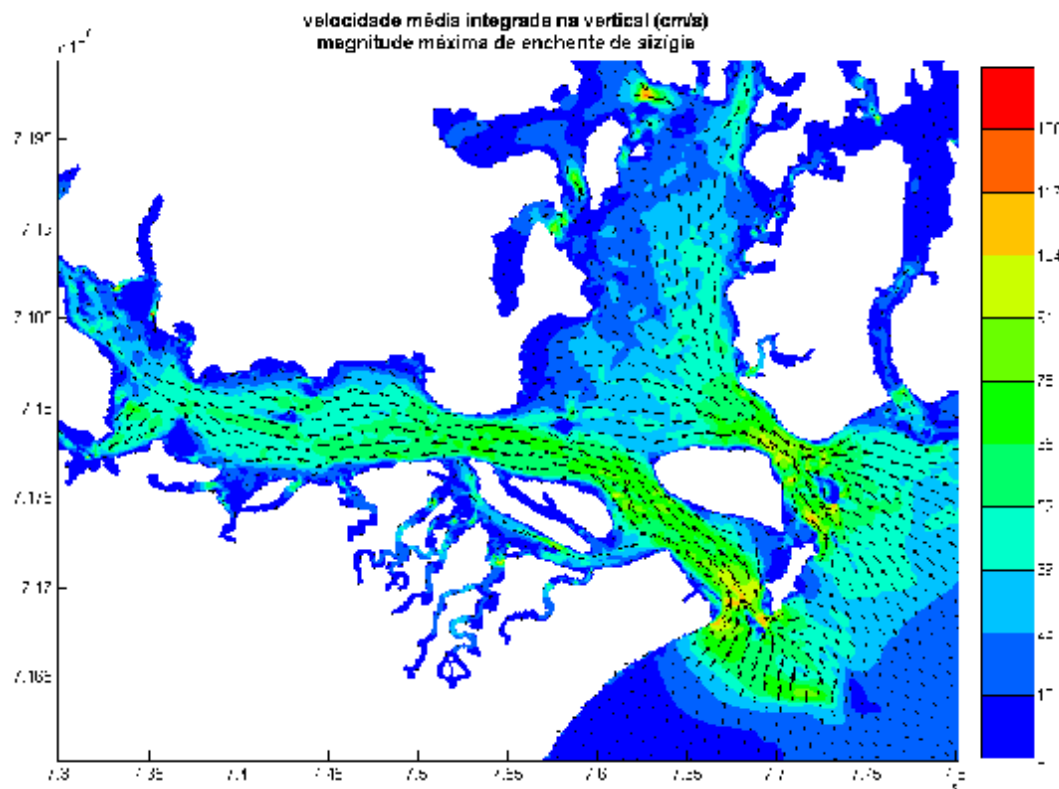
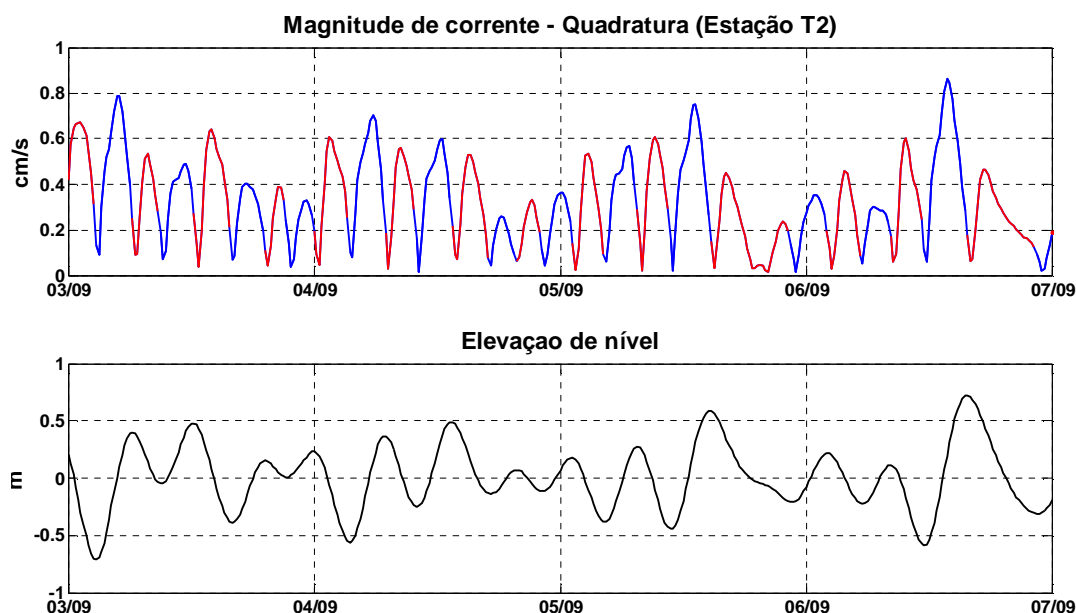


Fig. 26 – Velocidade média (cm/s) integrada na vertical das correntes máximas de vazante de sizígia (12/09/2007 23:00)



**Fig. 27 – Velocidade média (cm/s) integrada na vertical das correntes máximas de enchente de sizígia (13/09/2007 03:00)**

O comportamento das correntes na quadratura é bem variado, em decorrência dos componentes não lineares de maré. As magnitudes de corrente de enchente e vazante são mais equiparadas e diferentemente da sizígia ocorrem algumas situações em que as correntes máximas de enchente superam as máximas de vazante. A figura 28 mostra as magnitudes de corrente para o período de quadratura, em que os valores de corrente em azul representam períodos de enchente enquanto que valores em vermelho representam períodos de vazante.



**Fig. 28 – Magnitudes de corrente para quadratura (03/09/2007 a 07/09/2007).** No gráfico superior em cor azul está representada a magnitude de corrente nos períodos de enchente, e em vermelho a magnitude de corrente para os períodos de vazante. O gráfico inferior representa as variações da elevação de nível.

Para análise do balanço de massa de água de entrada e saída da Baía de Paranaguá foram computados os valores acumulados de descarga nos períodos de quadratura e sizígia nas duas seções transversais que coincidem com os transectos Ponta do Poço – Ilha do Mel e Ilha do Mel – Piaçaguera, cujos pontos intermediários são B4 e B2, respectivamente, representados na figura 29.

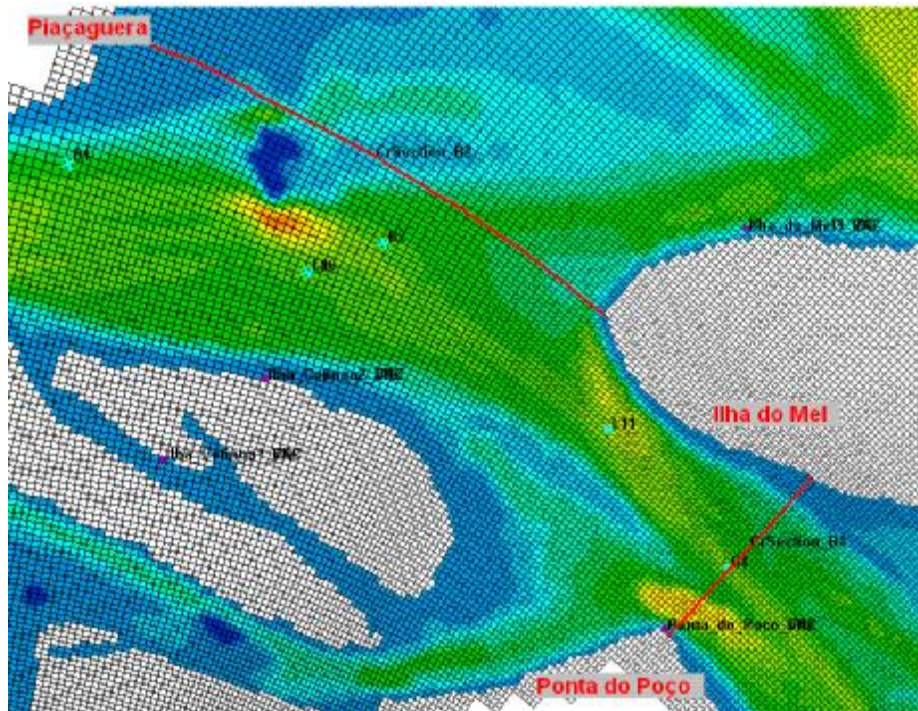
Verificou-se que o comportamento de entrada e saída de massas de água difere quantitativamente em se tratando de quadratura e sizígia. A seção transversal B2 (Ilha do Mel – Piaçaguera) apresenta descarga acumulada positiva ao longo do tempo em quadratura e sizígia, sendo esta última bem mais acentuada. Como a orientação é positiva no sentido Oeste – Leste, a seção transversal B2 é uma exportadora de massas de água e de suas propriedades, da Baía de Paranaguá.

A seção transversal B4 (Ponta do Poço – Ilha do Mel) apresenta descarga acumulada negativa ao longo do tempo em quadratura e sizígia, sendo esta última bem mais acentuada. Significa, portanto, que a seção transversal B4 é uma importadora de massas de água e de suas propriedades, da plataforma continental interna para a Baía de Paranaguá.

Os gráficos superiores da figura 30 apresentam as descargas acumuladas em tracejado de B2 (azul) e B4 (vermelho), bem como as tendências nas mesmas cores. Em

verde está representada a tendência da soma das descargas acumuladas. O gráfico inferior apresenta o balanço geral de B2 e B4 somados entre si e entre os períodos de quadratura e sizígia, a curva em tracejado e a tendência em linha contínua.

Somando-se as descargas acumuladas das duas seções, verifica-se que na quadratura a tendência resultante é positiva, em decorrência da descarga fluvial e forçantes de maré um pouco mais amenas neste período. Na sizígia verifica-se uma tendência resultante praticamente nula, em decorrência da menor descarga fluvial deste período e da forçante de maré ser mais intensa.



**Fig. 29 – Seções transversais B2 (Ilha do Mel – Piaçaguera) e B4 (Pontal – Ilha do Mel) que delimitam a área considerada para balanço de massa de água da Baía de Paranaguá**



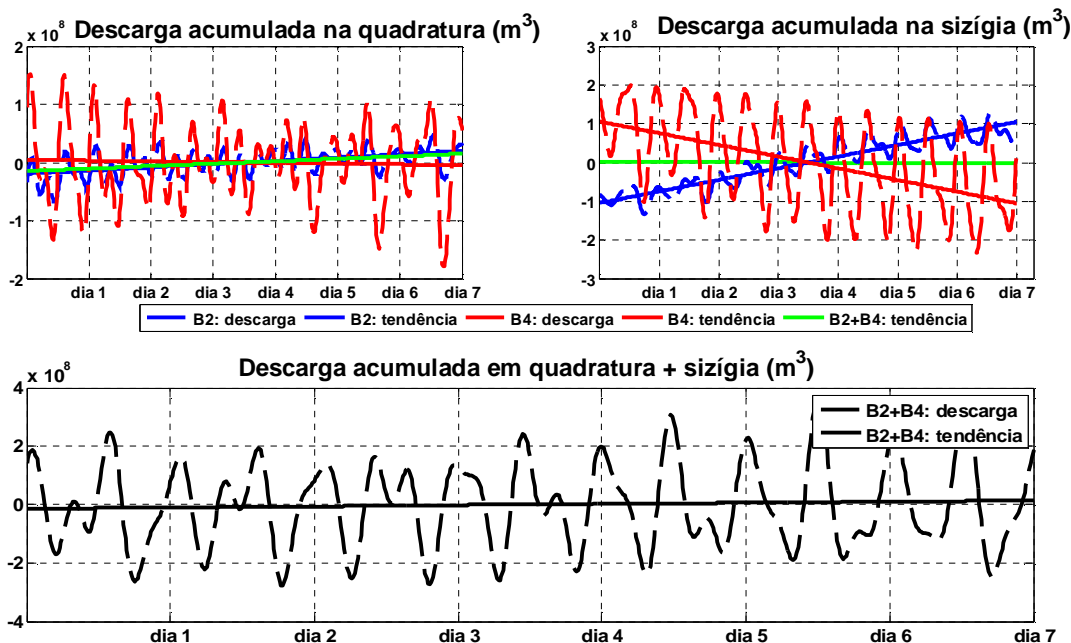


Fig. 30 – Balanço de massas de água para quadratura, sizígia e os dois períodos conjugados. Os dois gráficos superiores representam as descargas acumuladas referentes aos transectos B2 (azul) e B4 (vermelho) e suas respectivas tendências, bem como a tendência da soma das descargas de B2 e B4 (em verde) para os períodos de quadratura e sizígia. O gráfico inferior representa a soma das descargas acumuladas dos dois transectos (linha tracejada) e a tendência (linha contínua) para quadratura e sizígia conjuntamente.

Analisando a soma das vazões acumuladas das duas seções (B2 e B4) e para os dois períodos (quadratura e sizígia), verifica-se uma tendência positiva para quadratura (taxa de  $48.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e uma leve tendência negativa para sizígia (taxa de  $-2.48 \text{ m}^3/\text{s}$ ), indicando exportação de massas de água na quadratura (como esperado em decorrência das descargas fluviais), e uma leve importação ou retenção de água na sizígia. As forçantes de maré se sobrepõem de tal forma em relação às descargas fluviais na sizígia que a baía passa a ser até mesmo importadora de massas de água e propriedades da plataforma continental interna.

O balanço das massas de água foi aqui analisado somente para uma escala de tempo de duas semanas, abrangendo quadratura e sizígia. Uma análise mais completa poderia ser feita considerando frequências menores representadas pelas variações de forçantes sazonais (inverno e verão), ou mesmo escalas maiores de tempo, e incluindo a ação das forçantes de vento e variações das descargas fluviais.



## 5.2 Salinidade e Temperatura

Além de ser fator determinante na ocupação dos organismos, a distribuição de sal nos estuários tem grande importância no estudo da qualidade da água. A distribuição de sal pode afetar a estratificação da coluna de água, e conseqüentemente o fluxo de gases, substâncias e organismos no meio, além de influenciar o processo de floculação dos sedimentos coesivos, alterando a concentração do material particulado em suspensão, e agir na taxa de mortalidade de bactérias e outros organismos impactantes ao meio.

Como substância conservativa, a salinidade não está sujeita a processos de qualidade da água, apenas ao transporte, o que permite distinguir os efeitos de transporte e processos das outras substâncias. De uma forma geral, a salinidade indica o destino da água doce proveniente dos rios na mistura com a água salina.

Para modelagem da salinidade, foi utilizada condição inicial uniforme de 0 g/kg, condições nos contornos abertos da plataforma continental interna de 31 g/kg e concentrações de 0 g/kg nas descargas fluviais, com vazões de acordo com os dados proveniente da ANA. Foram realizadas simulações iniciando-se no mês de agosto, com valores médios semanais de vazão, por todo o mês, até se verificar estabilidade nas concentrações de sal ao longo da baía, para então utilizar valores médios diários de vazão para o mês de setembro.

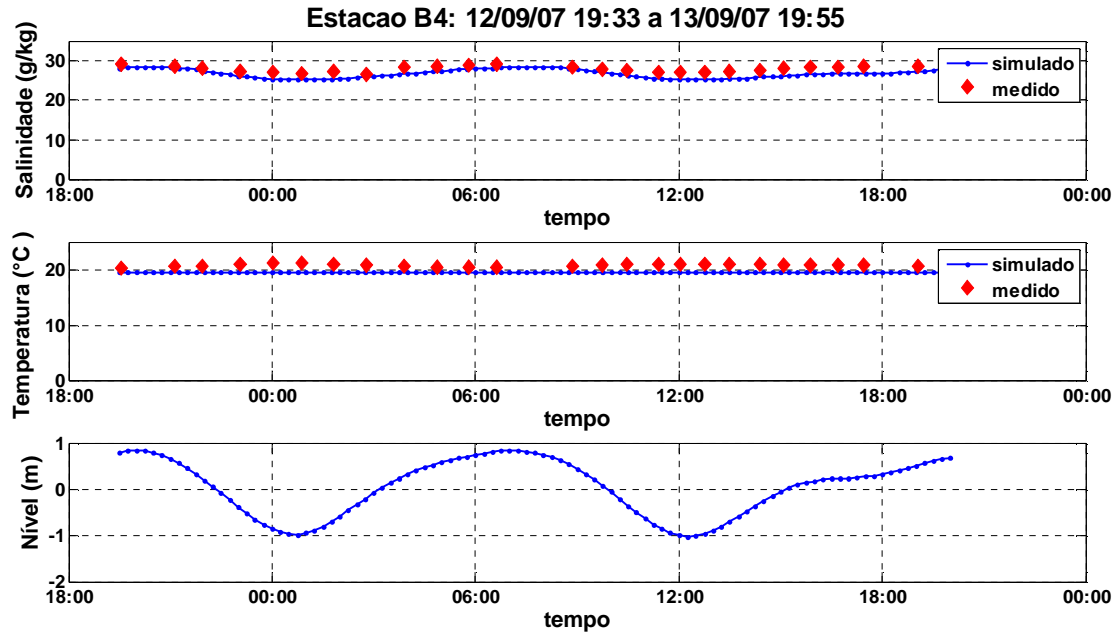
A distribuição de temperatura em um estuário é dependente da temperatura das fontes de água doce e marinha, dos processos de mistura, bem como das trocas de calor através da superfície enquanto a água circula pelo estuário (Bowden, 1980).

A temperatura da água tem importância na qualidade da água por afetar taxas de reações físicas, químicas e biológicas, alteração da solubilidade de gases (ex: oxigênio dissolvido) bem como em taxas de transferência, ocasionando, por exemplo, liberação de gases com odores desagradáveis.

Para modelagem da temperatura optou-se por utilizar o modelo denominado no Delft3D-Flow como *excess temperature*, em que a temperatura é calculada levando-se em consideração a troca de calor na interface ar-água. O calor excedente é transferido da superfície da água para a atmosfera por evaporação, radiação de ondas longas e convecção, e o fluxo total de calor é proporcional à temperatura excedente na superfície. Os coeficientes de transferência de calor dependem principalmente da temperatura da água e da velocidade do vento (WL | Delft Hydraulics, 2007a), bastando para tal inserir as séries temporais dos valores de temperatura do ar e magnitude e direção de vento, obtidos através da estação meteorológica do CEM.

A temperatura foi modelada utilizando-se valores nas fronteiras abertas dos rios de 22 °C e valores de 19 °C nos contornos com a plataforma continental.

As figuras 31, 32 e 33 apresentam a comparação de valores de salinidade e temperatura medidos nas campanhas de sizígia com relação aos valores simulados para as estações B4, T1 e T2, respectivamente.



**Fig. 31 – Comparação entre valores medidos e simulados de salinidade e temperatura para sizígia – estação B4.** O gráfico superior representa a salinidade simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos), o segundo gráfico representa a temperatura simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos) e o último gráfico representa a variação de nível no período considerado. A média do erro percentual absoluto foi de 5% para salinidade e 6% para a temperatura.

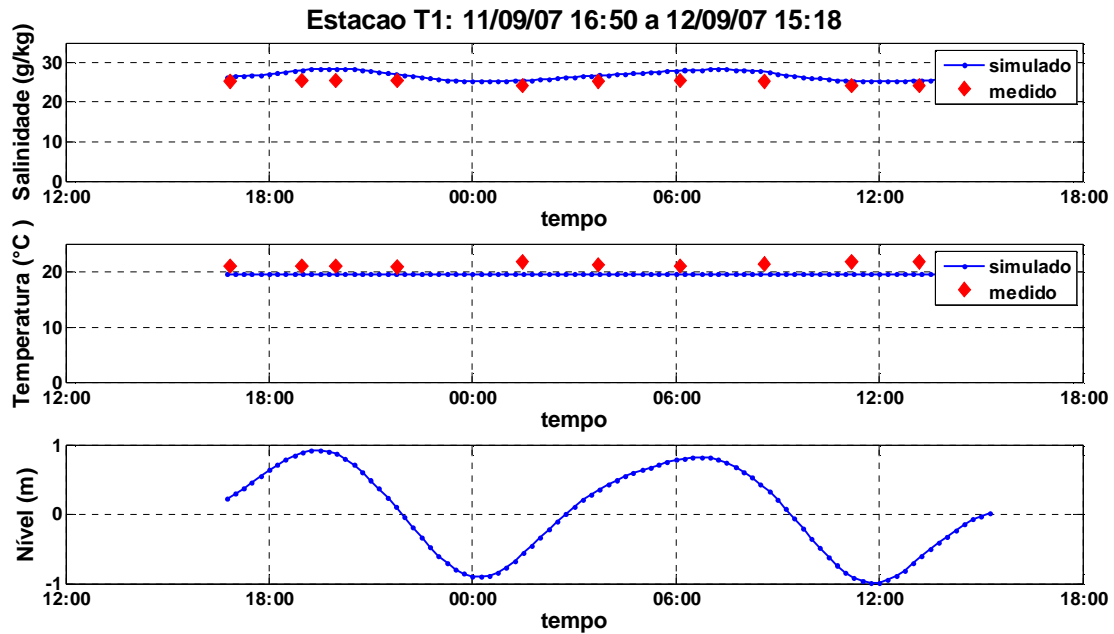


Fig. 32 – Comparação entre valores medidos e simulados de salinidade e temperatura para sizígia – estação T1. O gráfico superior representa a salinidade simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos), o segundo gráfico representa a temperatura simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos) e o último gráfico representa a variação de nível no período considerado. A média do erro percentual absoluto foi de 7% para salinidade e 8% para a temperatura.

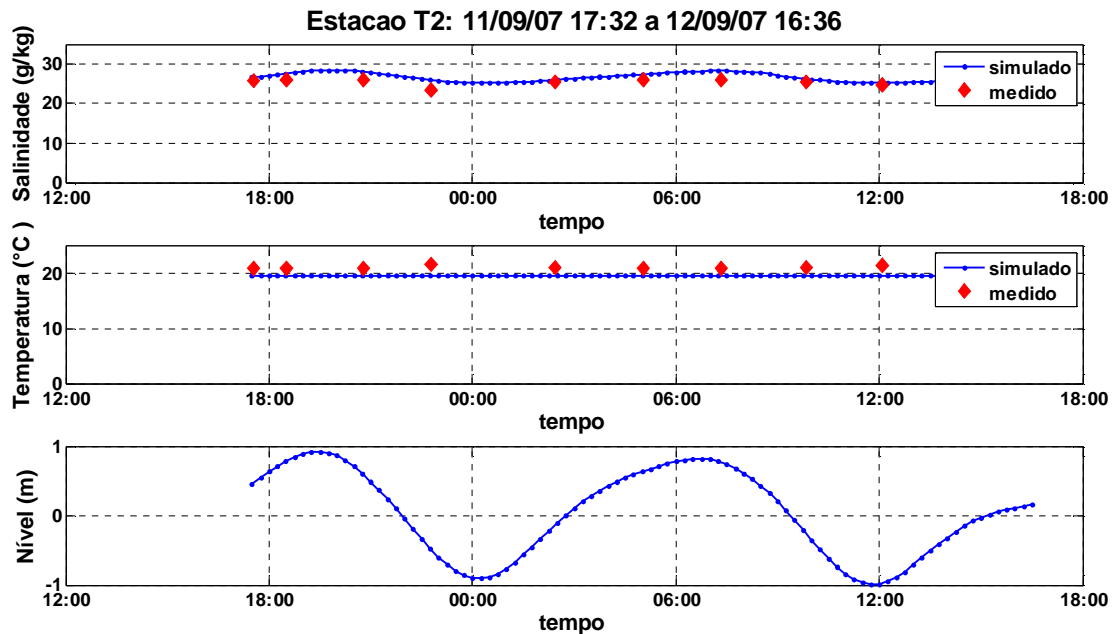


Fig. 33 – Comparação entre valores medidos e simulados de salinidade e temperatura para sizígia – estação T2. O gráfico superior representa a salinidade simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos), o segundo gráfico representa a temperatura simulada (linha azul) e medida (pontos vermelhos) e o último gráfico representa a variação de nível no período considerado. A média do erro percentual absoluto foi de 5% para salinidade e 7% para a temperatura.

A média do erro percentual absoluto da salinidade para as estações B4, T1 e T2 foi de 5%, 7% e 5%, respectivamente. A média do erro percentual absoluto da temperatura para as estações B4, T1 e T2 foi de 6%, 8% e 7%, respectivamente. Os valores de salinidade medidos e simulados apresentaram boas correlações para as três estações. A partir da comparação com a variação de nível percebe-se que os valores simulados acompanharam as variações de salinidade forçadas pela maré. A ausência de precipitações no período favoreceu a concordância dos resultados, visto que os principais aportes fluviais da baía foram os rios considerados no modelo (Cachoeira e Nhundiaquara), evitando-se ausência de dados de pequenos aportes fluviais que passam a ser mais significativos no aporte total em dias chuvosos.

Os valores simulados e medidos de temperatura mostraram boa concordância, embora seja necessário aplicar o modelo de temperatura a períodos de maior variabilidade termal para efeito de calibração do modelo.

A simulação da distribuição da salinidade na Baía de Paranaguá pode ser observada na figura 34. O mapa de salinidade refere-se à mesma data em que foram realizadas as medições do transecto longitudinal (figura 8).

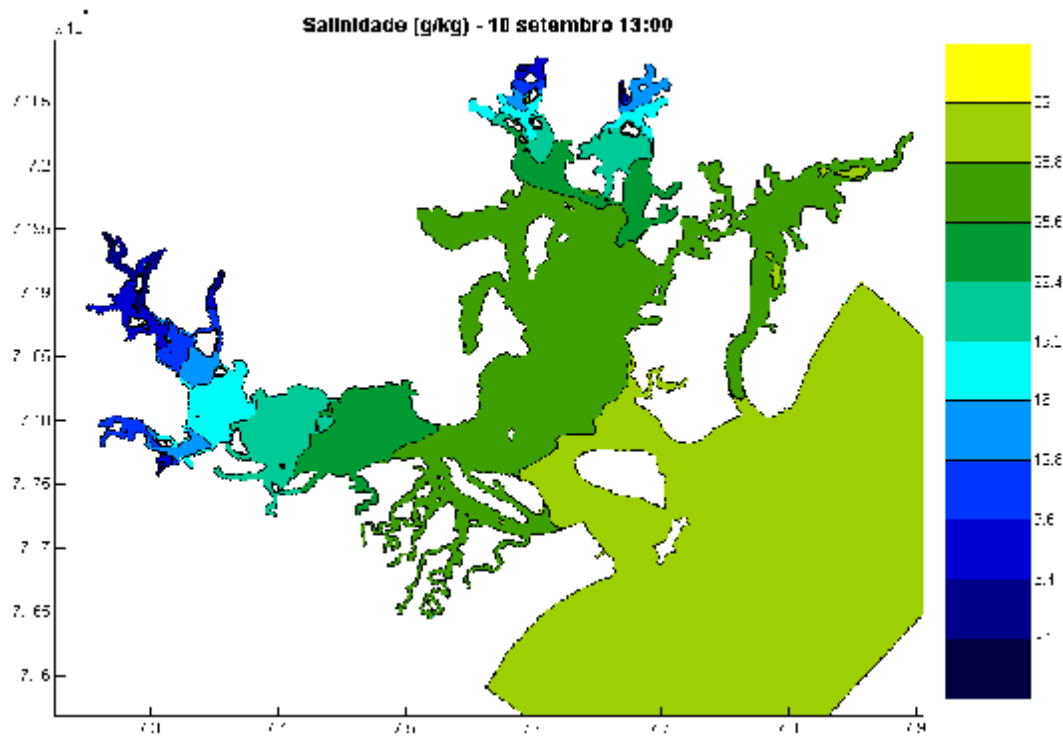


Fig. 34 – Mapa de Salinidade da Baía de Paranaguá – 10 de setembro 13:00 (sizígia)

### 5.3 Escalas de tempo envolvidas nos processos de mistura

Uma visão geral das propriedades de mistura de um estuário é obtida através de métodos que estimam os tempos de descarga do estuário (Bowden, 1980). Estes métodos, mesmo que tratem o estuário com um todo, sem analisar o comportamento da mistura individualmente para cada região, são bastante úteis ao fornecer a escala de tempo estimada das propriedades da água envolvidas nos processos de mistura.

#### 5.3.1 Prisma de maré da Baía de Paranaguá

O prisma de maré é definido como o volume de água do mar que entra no estuário durante a maré de enchente, intimamente relacionado com a altura de maré e, por conseguinte, a capacidade de renovação de massa de água durante um ciclo completo de maré (Miranda, 2002).

Foram calculados os prismas de maré para um ciclo de maré de quadratura e sizígia considerando somente o volume de água referente à Baía de Paranaguá propriamente dita, indicada na figura 35, delimitada por uma seção transversal no início da cidade de Paranaguá até o lado oposto.

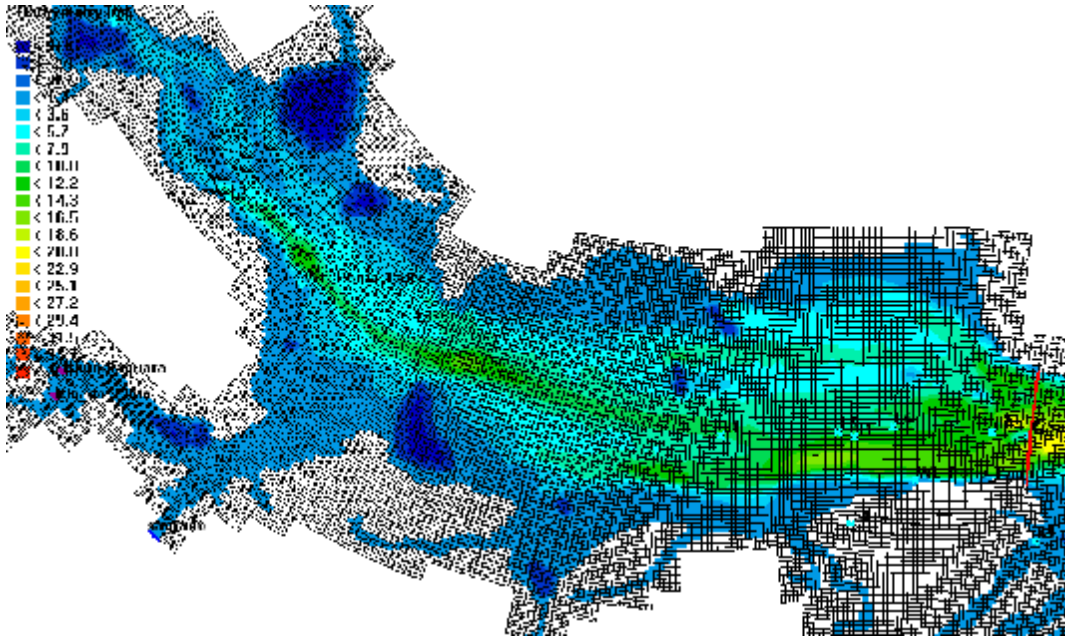


Fig. 35 – Região considerada da Baía de Paranaguá para cálculo do prisma de maré.

Para sizígia foi calculado um prisma de maré de  $2.84 \times 10^8 \text{ m}^3$  enquanto que para quadratura foi calculado um prisma de maré de  $1.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ . Para se estabelecer uma primeira aproximação a importância relativa entre as forçantes maré e descarga fluvial, pode-se calcular a razão de fluxo, determinada numericamente pela razão entre o volume

de água fluvial descarregado no estuário no período de maré e o prisma de maré. Para o período relacionado aos prismas de maré calculados, foram encontradas razão de fluxo de 0.0034 para sizígia e 0.0058 para quadratura.

A razão de fluxo é utilizada como critério indicativo de mudanças entre os tipos de estratificação vertical de salinidade, devido à maior ou menor influência na descarga fluvial e da maré, baseado em experimentos em diferentes estuários foi estabelecido que (Miranda, 2002):

- Razão de fluxo  $\geq 1$  → altamente estratificado;
- Razão de fluxo próxima a 0.25 → parcialmente misturados;
- Razão de fluxo  $< 0.1$  → bem misturados.

O cálculo da razão de fluxo para os períodos de sizígia e quadratura para setembro de 2007 (baixa precipitação e baixa descarga fluvial) com base neste critério inclui a Baía de Paranaguá no grupo de estuários bem misturados.

### 5.3.2 Tempo de descarga da Baía de Paranaguá

Em uma estimativa simples do tempo de descarga, a água doce é utilizada como um traçador e assume-se condição estacionária, ou seja, que a água doce é removida por descarga na mesma razão em que é adicionada pela descarga fluvial (Bowden, 1980), calculado por:

$$t_{desc} = V_f / Q_f \quad \text{Eq. 33}$$

Onde:

$t_{desc}$	Tempo de descarga	H
$V_f$	Volume total de água doce acumulada no estuário	m <sup>3</sup>
$Q_f$	Vazão de entrada de água doce	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>

A fração de água doce em um determinado volume de água no estuário pode ser calculada por:

$$f = S_o - S / S_o \quad \text{Eq. 34}$$

Onde:

$f$	Fração de água doce em um volume de água estuarino	%
$S_o$	Salinidade da água do mar no exterior do estuário	g/kg

$S$  Salinidade do volume de água considerado g/kg

E para determinar o volume total de água doce acumulada no estuário:

$$V_f = \sum f dV \quad \text{Eq. 35}$$

Onde:

$dV$  Elemento de volume  $m^3$

E, finalmente:

$$dV = H \cdot Surf \quad \text{Eq. 36}$$

Onde:

$H$  Profundidade  $m$

$Surf$  Área da superfície do segmento ou célula  $m^2$

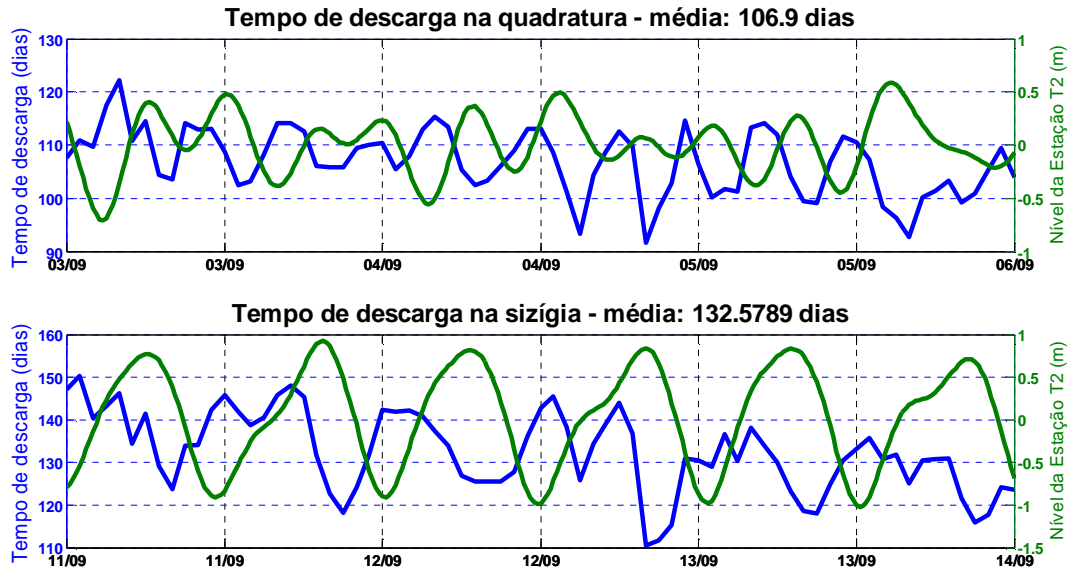
A figura 36 apresenta o tempo de descarga calculado para a Baía de Paranaguá propriamente dita (mesma área demarcada pela figura 35) para três dias seguidos de quadratura e de sizígia. A salinidade considerada no contorno marinho foi de 31 g/kg, a descarga fluvial média no período de quadratura foi de 26.44 m<sup>3</sup>/s enquanto que para o período de sizígia foi de 19.82 m<sup>3</sup>/s. Para estes valores de descarga fluvial, o tempo de descarga médio foi de aproximadamente 107 dias para quadratura e 132 dias para sizígia.

Se considerarmos, porém, o último volume total de água doce calculado para os ciclos de sizígia (2.26x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>) em comparação com os valores estimados de 75 m<sup>3</sup>/s por Knoppers *et al.* (1987), o tempo de descarga aproximado, para um primeiro momento de incremento da vazão fluvial, seria de aproximadamente 35 dias, e se comparado com a vazão estimada por (Marone *et al.* (1997) de 200 m<sup>3</sup>/s, seria de 13 dias. Após algumas horas, porém a distribuição salina e consequentemente a fração de água doce na baía se modificariam, alterando o tempo de descarga.

O tempo de descarga é uma importante medida para estimar o tempo necessário para que a água doce retida na zona de mistura do estuário seja removida, juntamente com outras substâncias, com taxa equivalente à sua entrada (Miranda, 2002).

Ao se comparar a variação do tempo de descarga com a variação de nível na figura 36, principalmente na sizígia, verifica-se que na enchente a água doce é represada na baía provocando um leve incremento do tempo de descarga. A partir do decréscimo das velocidades de corrente para o interior da baía, e mais intensamente a partir do início da

vazante, o tempo de descarga decai abruptamente, visto que as magnitudes das correntes são maiores e o fluxo de saída de água doce supera o fluxo de entrada. À medida que as velocidades de corrente diminuem, a água doce passa a ser acumulada novamente na baía, com incremento do tempo de descarga.



**Fig. 36 – Tempos de descarga para a Baía de Paranaguá.** O gráfico superior representa o tempo de descarga (dias) representado em azul para a quadratura, e o nível da estação (m) representado em verde. O gráfico inferior representa o tempo de descarga (dias) representado em azul para a sizígia, e o nível da estação (m) representado em verde.

### 5.3.3 Tempo de residência

Diferentemente do tempo de descarga que representa uma medida do sistema como um todo através de um único valor, o tempo de residência calculado pelo Delft3D-WAQ é uma medida local que varia espacialmente. O tempo de residência representa o tempo necessário para troca de água em um determinado segmento ou célula computacional. Este processo leva em conta apenas os processos advectivos, sem considerar processos de dispersão. O cálculo é obtido por:

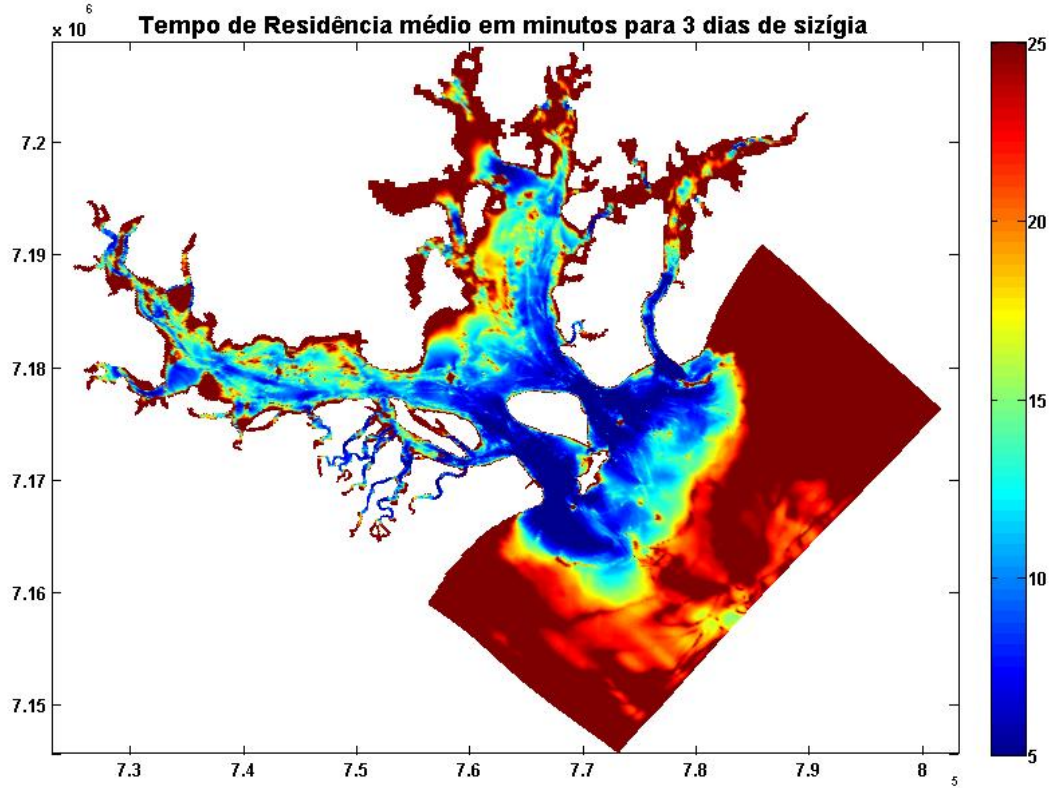
$$T_{res} = \frac{Vol}{\sum_{trocas} |Q|/2} \quad \text{Eq. 37}$$

Onde:

$T_{res}$	Tempo de residência da célula computacional	s
$Vol$	Volume da célula computacional	m <sup>3</sup>
$Q$	Vazão de água nas fronteiras	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>



O mapa do tempo de residência médio expresso em minutos obtido para simulação de três dias em maré de sizígia (11/09/2007 a 14/09/2007) é apresentado na figura 37.



**Fig. 37 – Tempos de residência médio da Baía de Paranaguá (minutos) referente ao período de três dias em sizígia.**

#### 5.3.4 Idade de uma massa de água

A idade de uma massa de água a partir de uma fonte específica em uma célula computacional é definida como a diferença entre o tempo atual e o tempo de lançamento da massa de água na área de modelagem através da fonte (WL | Delft Hydraulics, 2005). A determinação da idade da água se dá através da combinação entre um traçador conservativo e um traçador não conservativo (com tempo de decaimento), tal que este último serve como um contador de tempo após ser lançado simultaneamente com o primeiro (WL | Delft Hydraulics, 2007b). A idade da massa de água é calculada de acordo com:

$$Age_{tr} = \frac{\ln\left(\frac{Cd_{tr}}{Cc_{tr}}\right)}{Td_{tr}}$$

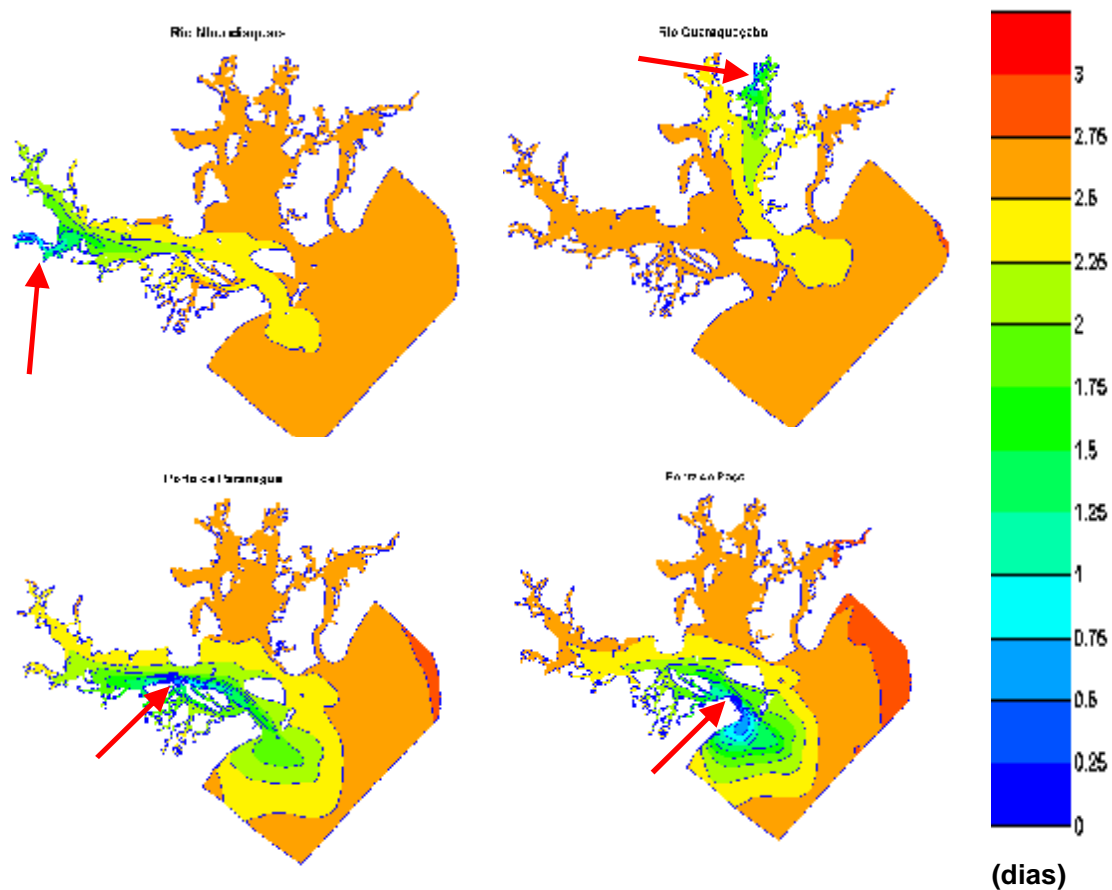
**Eq. 38**

Onde:

$Age_{tr}$	Idade do traçador	d
$Cd_{tr}$	Concentração do traçador simulado como não conservativo	$g.m^{-3}$
$Cc_{tr}$	Concentração do traçador simulado como conservativo	$g.m^{-3}$
$Td_{tr}$	Taxa de decaimento de primeira ordem do traçador não conservativo	$d^{-1}$

A ferramenta de idade da água pode ser utilizada para verificar o comportamento da dispersão e descarga de um lançamento a partir de uma determinada fonte, e combinado com o tempo de residência pode ser bastante útil na verificação da localização de pontos de despejos mais adequados no sistema. Espera-se que a idade da massa de água tenha um padrão crescente do interior para o exterior da baía. O confinamento de massas de água mais antigas em determinadas regiões podem indicar locais propícios a impactos ambientais.

Para análise da idade da massa de água, foram inseridas no modelo concentrações de 1 mg/l (valor sugerido por WL | Delft Hydraulics, 2007b) para ambos traçadores, conservativos e não conservativos, e simulação realizada em um período de três dias de maré de sizígia para quatro fontes distintas: Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço. Os lançamentos foram realizados a partir da maré baixa de sizígia. Os resultados são apresentados na figura 38.



**Fig. 38 – Idade de massa de água (dias) a partir de diferentes fontes do CEP (Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço). Os pontos de lançamento estão indicados pelas setas vermelhas.**

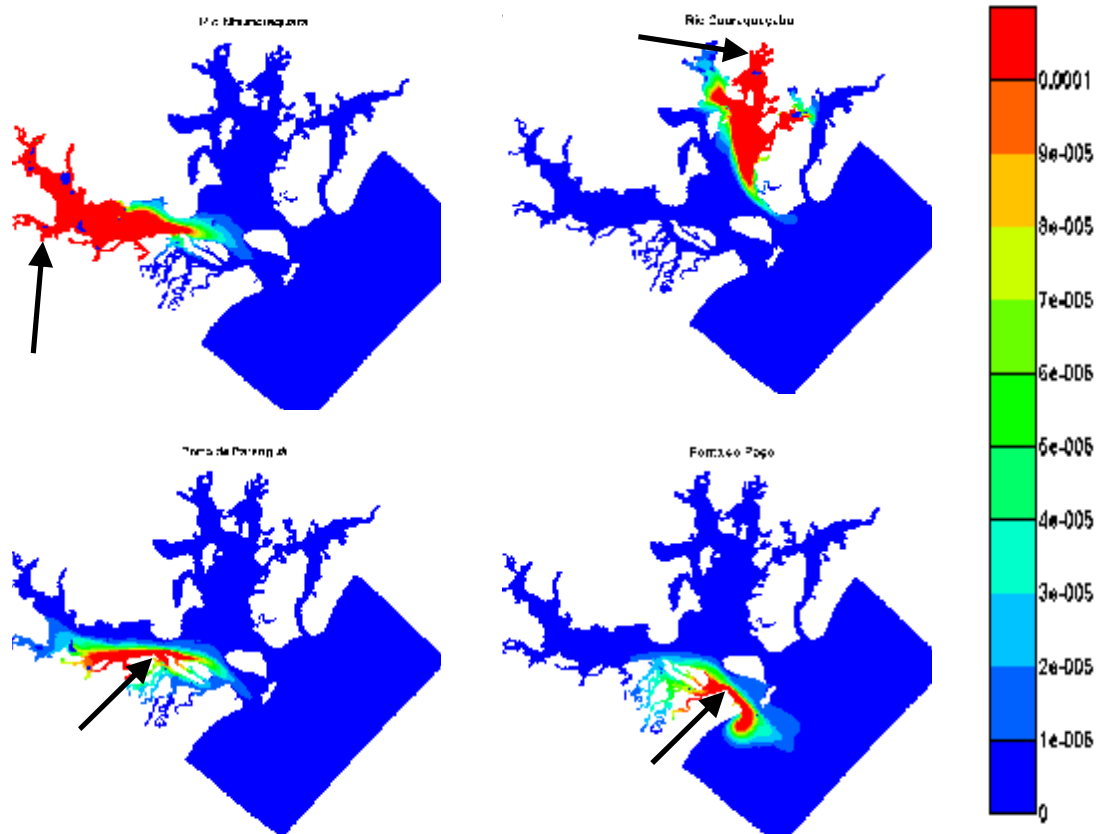
Para o Rio Nhundiaquara parte da pluma do traçador se desloca para o interior da Baía de Antonina indicando confinamento e parte para o exterior do CEP preferencialmente pelo canal Sul e outra menor parcela pelo canal Norte. Para o Rio Guaraqueçaba, parte de uma massa de água mais antiga se desloca para o interior da Baía de Laranjeiras indicando confinamento e outra parte se desloca para o exterior do CEP, preferencialmente pelo Canal Norte.

Verifica-se que o traçador lançado no Porto de Paranaguá tende a se misturar para o interior da Baía de Paranaguá se dispersando longitudinalmente na baía e se concentrando preferencialmente na sua parte sul. Para a Ponta do Poço as massas de água se misturam para o interior em direção aos canais de mangue e para a parte externa do CEP pelo canal Sul, anteriormente às outras fontes analisadas.

Porém, o comportamento da pluma do traçador na área externa da baía deve ser visto com cautela, pois visto que o modelo objetiva simular a parte interna da Baía de

Paranaguá, as forçantes consideradas nas bordas da plataforma continental restringem-se às elevações de nível decorrente de constituintes astronômicas, sem levar em conta a corrente de deriva litorânea, aqui no caso sentido Sul – Norte e as forçantes decorrentes de ondas.

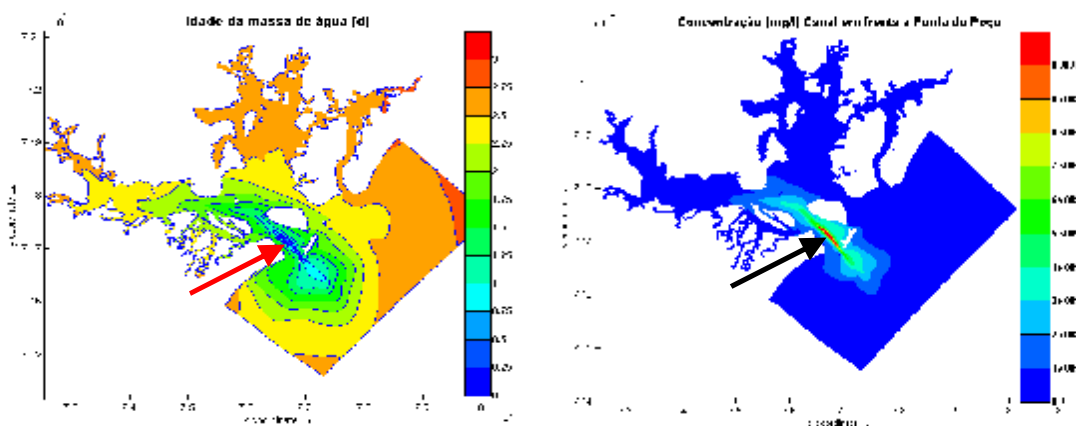
Deve-se atentar que embora a fração de água doce percorra em menos de 3 dias toda a extensão do CEP, a concentração do poluente lançado nestes limites ainda é ínfima. O cálculo do tempo de descarga sugere que a escala de tempo necessária para que uma propriedade despejada ou poluente alcance uma condição estacionária será de vários meses ou anos. Uma comparação do comportamento da concentração dos traçadores conservativos para os lançamentos do Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço são apresentados na figura 39.



**Fig. 39 – Concentração do traçador conservativo lançado a partir do Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço (mg/l). Os pontos de lançamento estão indicados pelas setas.**

O confinamento de massa de água verificado em alguns pontos da baía na fase de sizígia reflete a análise obtida do balanço de massas de água no período. Os resultados sugerem que lançamentos em pontos de baixa velocidade, fora da área de abrangência do canal longitudinal da baía onde ocorrem maiores velocidades de fluxo, podem ficar confinados ou se concentrarem em águas interiores e canais de mangue impulsionados pela maré enchente. Um rápido experimento pode ser feito inserindo um ponto de

descarga no canal em frente à Ponta do Poço, onde ocorrem maiores velocidades de corrente e baixo tempo de residência. Os resultados das simulações para idade de massa de água e concentração do traçador conservativo estão ilustrados na figura 40.



**Fig. 40 – Concentração do traçador conservativo lançado a partir do Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço (mg/l). As setas indicam o local do lançamento.**

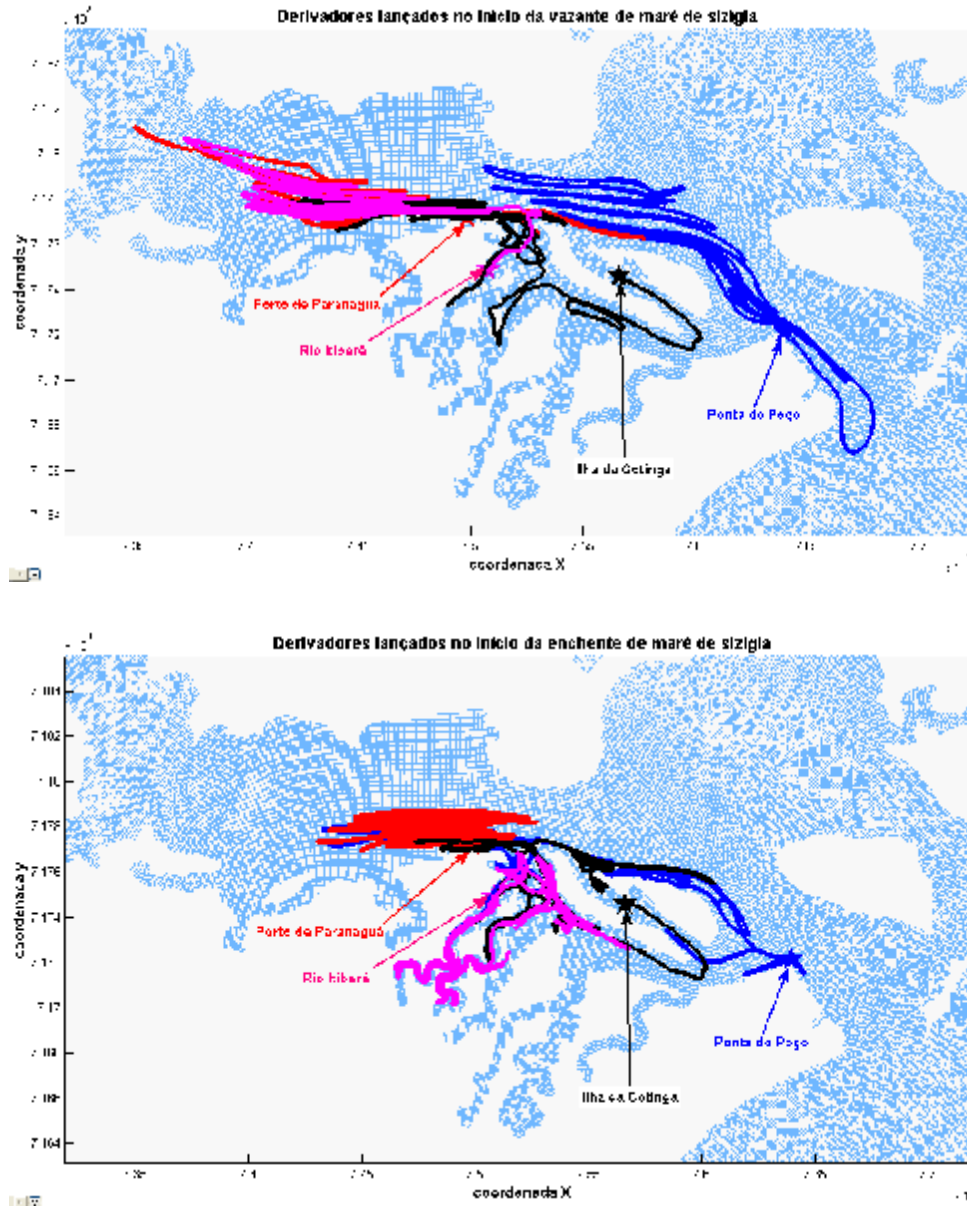
Verifica-se neste caso que o elemento traço, ao invés de se dispersar pelos canais de maré para o interior da baía em regiões de confinamento, é advectado pela corrente principal e atinge as águas exteriores em menor tempo. A análise da concentração final após três dias ilustra uma concentração bem menor do elemento traço no interior que àquele simulados anteriormente.

Embora intuitivamente já pudéssemos supor que o despejo de poluentes em regiões de alta velocidade apresentaria dispersão e mistura mais eficientes que o despejo em regiões de baixa velocidade, o uso do modelo, no entanto, além de identificar as regiões mais favoráveis ao despejo de poluentes, nos fornece também o comportamento da dispersão da pluma do despejo, bem como a quantificação local de sua concentração ao longo da escala de tempo de interesse, e para diferentes condições de despejo.

#### 5.4 Derivadores

Para analisar o destino de substâncias hipoteticamente introduzidas em alguns pontos da baía, utilizou-se de uma ferramenta do Deft3D-Flow que simula derivadores lançados em locais e tempos específicos. Foi simulado o lançamento de derivadores a partir de diversos pontos, tais como: Rio Emboguaçu, Rio Itiberê, Ilha da Cotinga, Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço, cada qual lançado em duas ocasiões distintas de marés de sizígia, uma no início da vazante e outra no início da enchente. A figura 41 mostra o lançamento dos derivadores no início da vazante e

enchente de maré de sizígia para os pontos Porto de Paranaguá, Ponta do Poço, Ilha da Cotinga e Rio Itiberê.



**Fig. 41 – Simulação de derivadores lançados no início de vazante e início de enchente de maré de sizígia para Porto de Paranaguá, Ponta do Poço, Rio Itiberê e Ilha da Cotinga.**

Optou-se aqui mostrar as trajetórias em maré de sizígia devido ao comportamento mais regular de elevações de nível e corrente assim como a maior consistência dos resultados da modelagem hidrodinâmica quando comparadas com as observações de campo. Como a trajetória dos derivadores depende da condição inicial de corrente do ponto de lançamento e arredores, torna-se difícil obter conclusões que generalizem um comportamento para diversas condições. A partir do experimento repetido em diversas

condições pode-se, porém, estimar os potenciais destinos de objetos lançados nos pontos de análise.

Com relação à Ilha da Cotinga, verificou-se que na maioria das simulações o derivador lançado tanto na vazante quanto na enchente, tende a percorrer os canais de maré ao sul da ilha.

Com relação ao Rio Itiberê, verificou-se que o derivador pode tanto percorrer os canais de maré quanto se encaminhar para fora do rio e oscilar na região em frente ao porto de Paranaguá.

Com relação ao Porto de Paranaguá, verificou-se que na maioria das simulações o derivador percorre a região em frente ao Porto, podendo em certas situações, principalmente se lançado na enchente, percorrer os interiores da Baía de Antonina.

Com relação à Ponta do Poço, verificou-se que na maioria das simulações, se lançado na vazante o derivador consegue percorrer a parte externa à baía ou então oscilar de forma mais espalhada entre a Ilha da Cotinga e a Ilha do Mel. Na enchente, porém, o derivador tende a percorrer baía adentro pelos canais de maré ou então na região em frente ao Porto de Paranaguá.

É importante salientar que estas condições restringem-se a uma situação de seca com reduzido aporte fluvial e ventos fracos. Na presença de vazões mais elevadas, a capacidade da baía de exportar objetos para a plataforma continental aumenta. Da mesma forma que comentado anteriormente, aqui também deve-se analisar com desconfiança o comportamento dos derivadores nas regiões mais externas da Baía de Paranaguá.

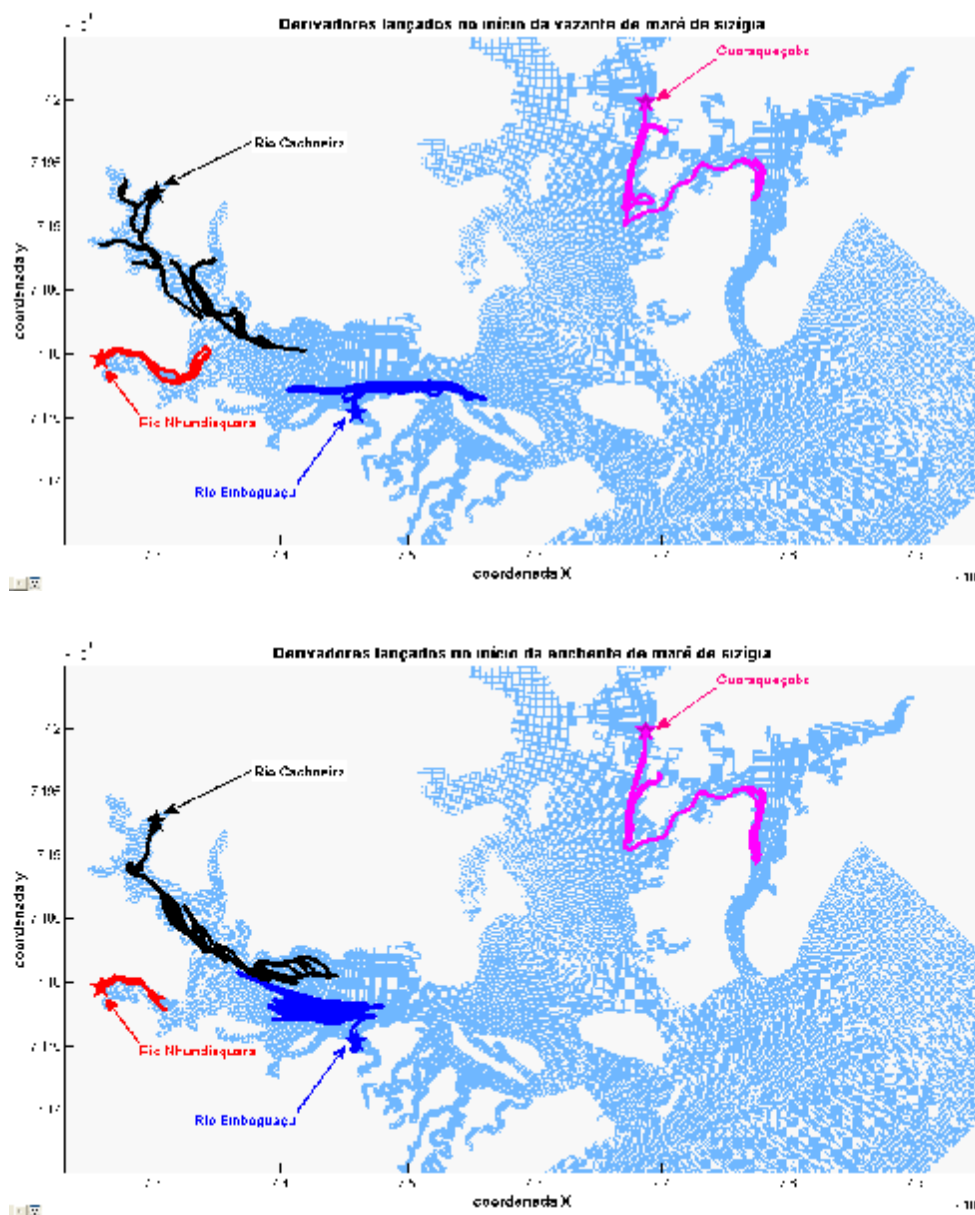
Com relação ao Rio Emboguaçu, verificou-se que na maioria das simulações o derivador percorre a região em frente ao Porto, podendo em certas situações, principalmente se lançado na enchente, percorrer o interior da Baía de Antonina, padrão muito semelhante do derivador lançado no Porto de Paranaguá.

Com relação aos rios Cachoeira e Nhundiaquara, verificou-se que na maioria das simulações o derivador percorre as regiões circunvizinhas, muitas vezes se entranhando nas singularidades do contorno da costa, locais de baixa velocidade, levando mais tempo até alcançar a Baía de Antonina e posteriormente percorrer a Baía de Paranaguá de forma mais espalhada.

Com relação à Guaraqueçaba, verificou-se que na maioria das simulações o derivador oscila entre Guaraqueçaba e Ilha das Peças até contornar ao norte da Ilha das Peças até a Baía de Pinheiros.



A figura 42 mostra o lançamento dos derivadores no início da vazante e enchente de maré de sizígia para os pontos Guaraqueçaba, Rio Cachoeira, Rio Nhundiaquara e Rio Embaúçu.



**Fig. 42 – Simulação de derivadores lançados no início de vazante e início de enchente de maré de sizígia para Porto de Paranaguá, Ponta do Poço, Rio Itiberê e Ilha da Cotinga.**

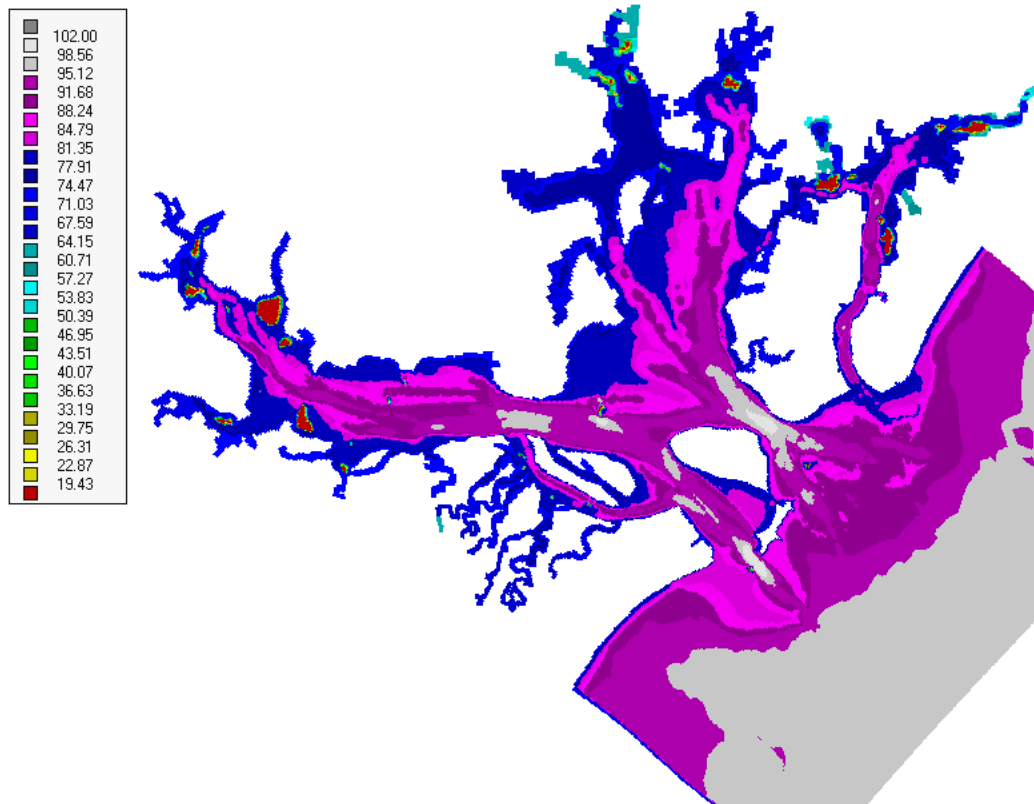
De forma geral, verifica-se que quanto mais próximo à cabeceira, menor a diferença de padrões dos derivadores lançados no início da vazante ou início da enchente.



## 5.5 Sedimentos

### 5.5.1 Coeficiente de Chèzy

Aplicando-se a formulação de Manning para cálculo do coeficiente de Chèzy bidimensional e aplicando-se a média ao longo de um ciclo de maré obteve-se um mapa do coeficiente na baía apresentado na figura 43.



**Fig. 43 – Mapa do coeficiente de Chèzy ( $m^{1/2}/s$ ) ao longo de um ciclo de maré.**

Observa-se concordância com o valor de  $90 m^{1/2}/s$  utilizado nas simulações hidrodinâmicas. As regiões de profundidades menores apresentam maior rugosidade e, portanto maiores valores de coeficiente de Chèzy. Estas regiões sob mesma velocidade de fluxo apresentam maiores tensões de cisalhamento de fundo e conseqüentemente maior capacidade de resuspensão de sedimento. No entanto, caso o sedimento predominante seja silte ao invés de areia, a superfície de fundo torna-se mais lisa e a rugosidade é reduzida.

O modelo ainda não diferencia as regiões de manguezais, ainda considerados como área seca. Os mangues atuam de forma complexa na hidrodinâmica do sistema, introduzindo uma força de arrasto na estrutura do fluxo de correntes.

### 5.5.2 Transporte de fundo de sedimentos não coesivos

O movimento das partículas ocorre quando a força exercida pelo fluxo instantâneo na partícula se sobrepõe às forças instantâneas resistentes, relacionadas com a força gravitacional, o empuxo e o coeficiente de fricção. Forças coesivas são relevantes especialmente na ocorrência de partículas de silte e argila (Van Rijn, 1993). Quando a tensão de cisalhamento de fundo se sobrepõe a um determinado valor crítico, dar-se-á início ao transporte da partícula. De acordo com Shields a tensão crítica de cisalhamento de fundo pode ser calculada por intermédio do diâmetro da partícula, densidade do fluido e do sedimento, calculando-se o parâmetro da partícula ( $D_*$ ) e o parâmetro crítico de Shields ( $q_{cr}$ ), da seguinte forma:

$$D_* = d_{50} \left[ \frac{(s-1)g}{u^2} \right]^{1/3} \quad \text{Eq. 39}$$

$$s = r_s / r_w$$

Onde:

$D_*$	Parâmetro da partícula	-
$q_{cr}$	Parâmetro crítico de Shields	-
$s$	Densidade relativa	-
$r_s$	Densidade da partícula	kg.m <sup>-3</sup>
$r_w$	Densidade do fluido	kg.m <sup>-3</sup>
$d_{50}$	Diâmetro médio da partícula	m
$u$	Coeficiente cinemático de viscosidade	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>

O parâmetro crítico de Shields pode ser obtido de acordo com:

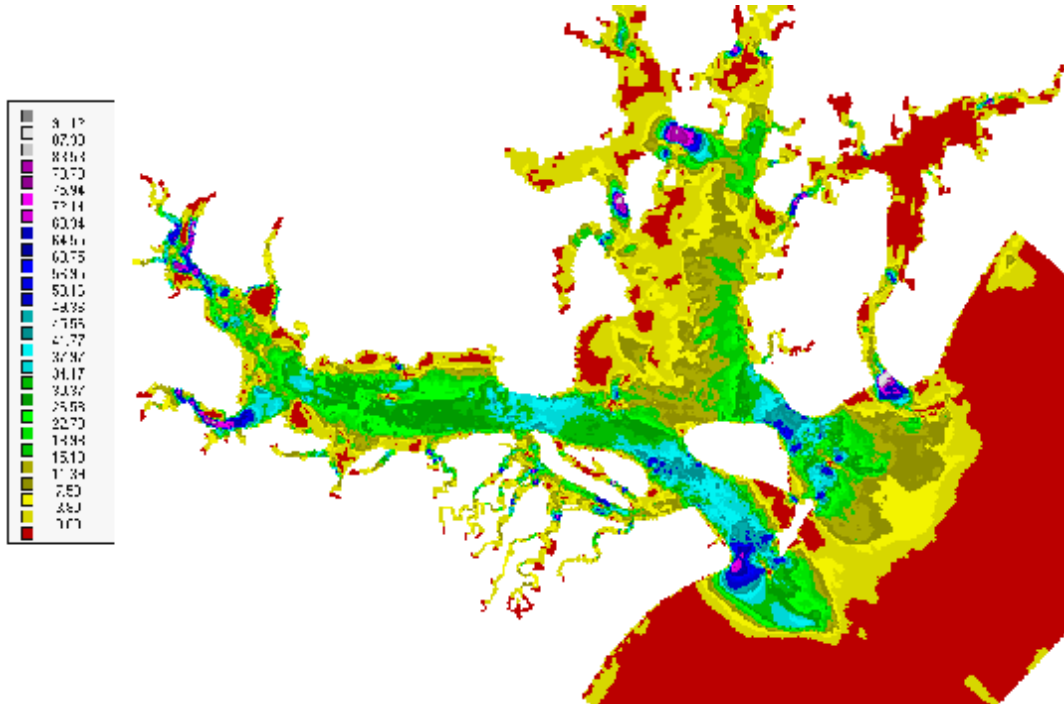
$$\begin{aligned} q_{cr} &= 0.24 D_*^{-1} & , \quad 1 < D_* \leq 4 \\ q_{cr} &= 0.14 D_*^{-0.64} & , \quad 4 < D_* \leq 10 \\ q_{cr} &= 0.04 D_*^{-0.1} & , \quad 10 < D_* \leq 20 \\ q_{cr} &= 0.013 D_*^{0.29} & , \quad 20 < D_* \leq 150 \\ q_{cr} &= 0.055 & , \quad 150 < D_* \end{aligned} \quad \text{Eq. 40}$$

E a tensão crítica de cisalhamento de fundo:

$$t_{cr} = q_{cr} r_w (s-1) g d_{50} \quad \text{Eq. 41}$$

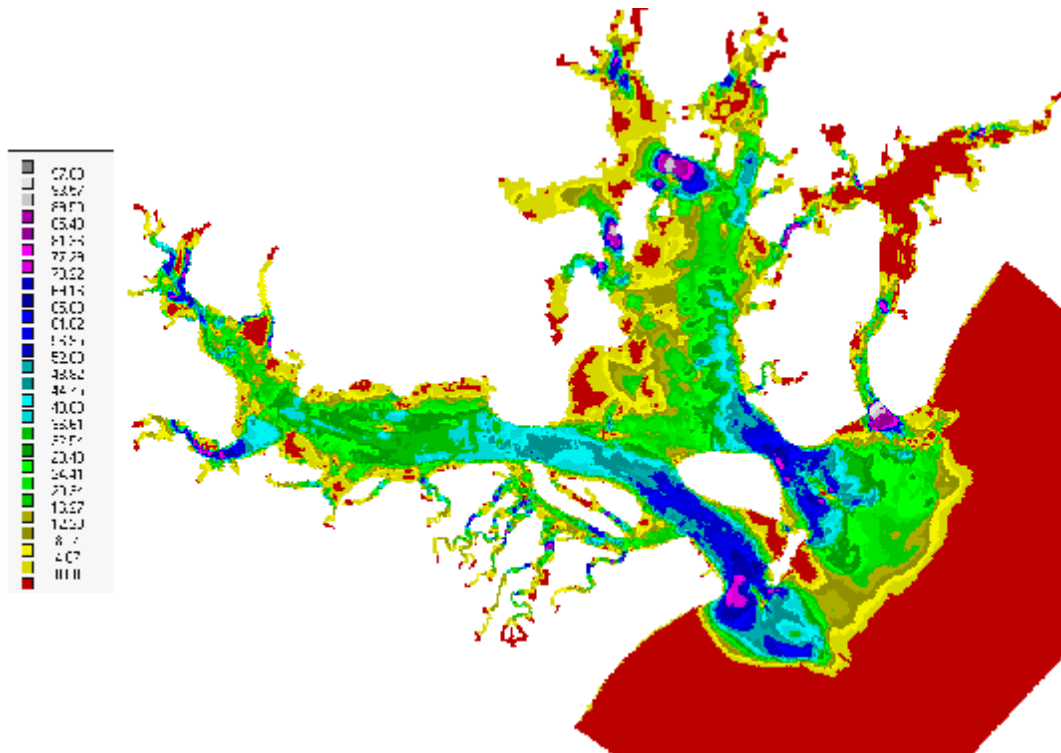
Considerando o maior diâmetro de areia fina (0.25 mm) e para areia muito fina (0.125 mm), obtém-se valores de tensão crítica de cisalhamento de fundo de  $0.1729 \text{ N.m}^{-2}$  e  $0.1533 \text{ N.m}^{-2}$ , respectivamente.

Comparando-se com as tensões de cisalhamento de fundo simuladas nas semanas 1 (quadratura) e semana 2 (sizígia), obteve-se um mapeamento do percentual de tempo em cada semana em que a tensão de cisalhamento de fundo se sobrepõe à tensão crítica para areia muito fina e areia fina, mostrada nas figuras 44 e 45.



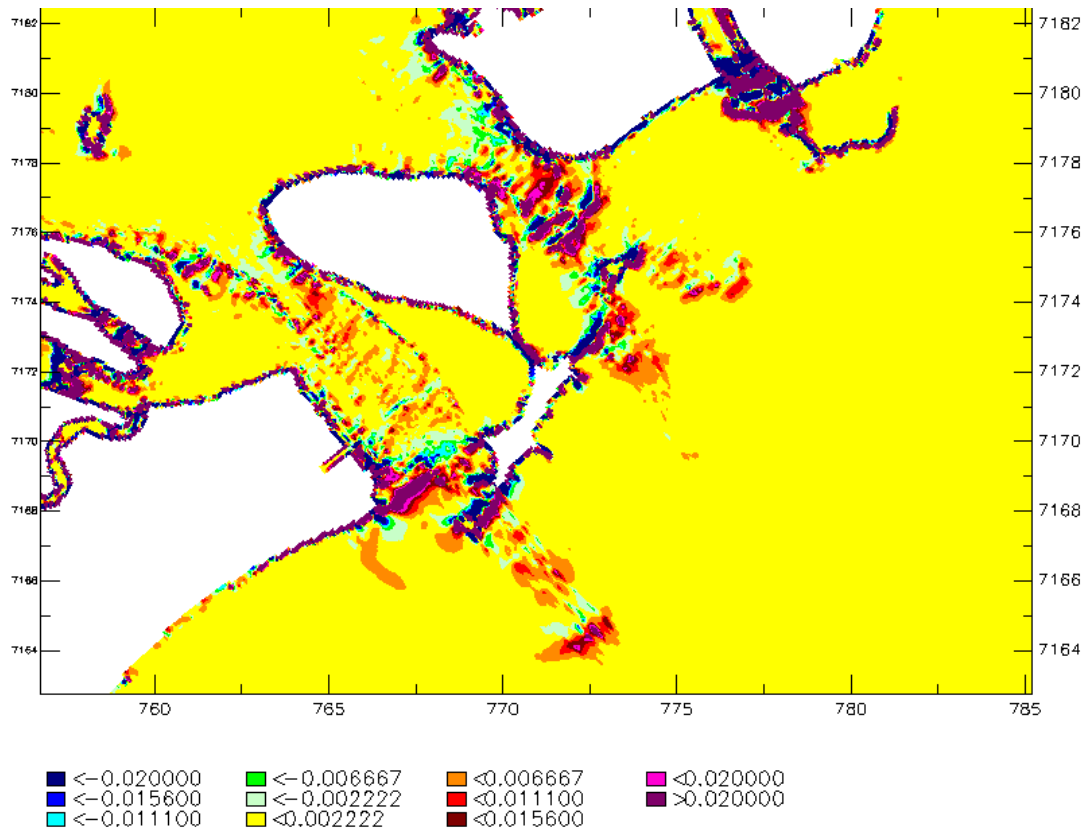
**Fig. 44 – Percentual de tempo com tensão de cisalhamento de fundo superior à tensão crítica (início de movimento) em um ciclo completo de maré para areia muito fina no período da quadratura.**

As regiões com menores percentuais representam, portanto, áreas com pouca capacidade de transporte de sedimento de fundo, ou de baixa energia (regiões em vermelho e amarelo). Estes locais podem servir de interesse para depósito de material dragado, pois apresentam processos erosivos mais brandos, porém, a escolha destes locais específicos deve ser baseada em estudos mais aprofundados, que envolvam escalas temporais sazonais, simulações de diversas condições de marés (incluindo meteorológica), descarga fluvial e ventos.



**Fig. 45 – Percentual de tempo com tensão de cisalhamento de fundo superior à tensão crítica (início de movimento) em um ciclo completo de maré para areia fina no período da sizígia.**

Com uso do processo denominado *calsand* para transporte de fundo de sedimentos não coesivos, considerando diâmetro médio de 0.125 mm, limite entre areia fina e areia muito fina, para após uma semana de simulação no ciclo de sizígia, obteve-se um mapa de camada de areia acrescida ou erodida que indica as principais regiões onde ocorre transporte de sedimentos. Para a escala de tempo de uma semana notam-se alterações nas áreas de maior velocidade de corrente, principalmente nos três canais principais de maré. A figura 46 mostra o mapa de erosão de areia resultado da simulação, indicando a altura da areia na célula computacional em mm, e, portanto valores negativos representam erosão e valores positivos representam assoreamento. Nota-se que valores negativos de altura de areia intercalam-se com valores positivos no sentido baía – oceano indicando que os fluxos de sedimento são preferencialmente para fora da baía, em decorrência das maiores velocidades de vazante. Seriam necessárias simulações em escala de tempo bem maior (vários meses) para uma melhor análise quantitativa do transporte de fundo de sedimentos arenosos na desembocadura e no interior da baía, a fim de avaliar de que maneira será afetada a batimetria local.



**Fig. 46 – Simulação de transporte de areia fina/muito fina com uso do processo CALSAND após uma semana de sizígia. Altura de areia em mm.**

O comportamento do transporte de sedimentos nos contornos fechados aqui não deve ser considerado em decorrência dos problemas numéricos ocorridos nos cálculos de velocidades, como mencionado no capítulo anterior, e que no processo *calsand* não pôde ser contornado.

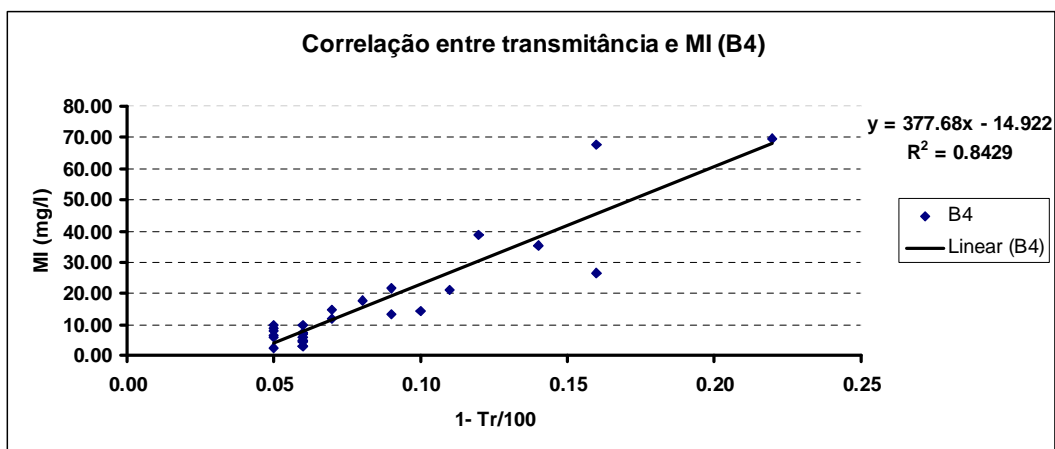
### 5.5.3 Material particulado em suspensão

Neste trabalho objetivou-se realizar uma primeira etapa na calibração do modelo de material particulado em suspensão da Baía de Paranaguá para silte e areia fina/muito fina. Os dados disponíveis para comparação são de concentração de MPS e de transmitância.

Os dados de concentração de MPS de superfície e fundo foram coletados por garrafas de Niskin e analisados no Laboratório de Química do CEM pelo método de STRICKLAND & PARSONS (1972) em que o MPS é retido em um filtro de 0,45  $\mu\text{m}$  e o cálculo da concentração baseia-se na diferença entre o peso do filtro com amostra retida e o peso do filtro anterior à filtragem dividida pelo volume de amostra filtrada. As medições de transmitância foram obtidas através de CTD com sensor *backscatter*

acoplado. As medições foram consideradas somente para o período de sizígia, visto que no período da quadratura não houve dados de turbidez/transmitância decorrentes de diversos imprevistos ocorridos durante a coleta. Os pontos de observação considerados para comparação foram os pontos B4 (areia: 86%; silte: 1%), T1 (areia: 49%; silte: 45%) e T2 (areia: 58%; silte: 34%).

O primeiro passo foi tentar correlacionar as medições de transmitância do CTD com os dados de concentração de MPS. Para tal, primeiramente foi verificada existência de correlação entre material particulado total e material particulado inorgânico, visto que os processos de modelagem de MPS do Delft3D-WAQ utilizados são para matéria inorgânica. O coeficiente de correlação de Pearson encontrado para os três pontos foram: B4(0.999), T1 (0.999) e T2(0.999). A seguir, foi verificada existência de correlação linear entre os dados de transmitância e os dados de MPS inorgânico. Para os pontos T1 e T2 não foi encontrada correlação linear entre os dados, com valores de  $R^2$  (quadrado do coeficiente de correlação de Pearson) de 0.36 e 0.58, respectivamente. Foi encontrada correlação aceitável para o ponto B4, com  $R^2$  de 0.84. Este resultado sugere existência de maior concentração de sólidos dissolvidos em para o interior estuário. A figura 47 mostra a correlação entre MPS inorgânico de transmitância para o ponto B4.



**Fig. 47 – Correlação entre MPS inorgânico e transmitância para o ponto B4 – sizígia.**

Desta forma, somente foram estimadas concentrações de MPS por intermédio de transmitância para o ponto B4. Calculou-se a transmitância média ao longo da coluna de água e em seguida aplicou-se a fórmula obtida de regressão linear como ilustrada na figura 47, tal que:  $Y = 377.68.X - 14.922$ , onde Y representa a concentração de MPS e X representa a transmitância (Tr) tal que  $X = 1 - (Tr/100)$ .

Uma breve análise da confiabilidade da transformação linear aplicada pode ser obtida substituindo-se na equação de correlação os valores de transmitância medidos e

comparando-se com os valores de concentração de MPS medidos. Verificou-se que o erro percentual absoluto médio é de 49.5%, ou seja, o cálculo da concentração de MPS através da transmitância deve ser considerado como uma tendência, porém não como referência absoluta, apesar da alta correlação encontrada.

Ainda com relação às medições de concentração de MPS, convém ressaltar que não há distinção entre percentual de silte e areia no total de MPS. Além disso, a distribuição da concentração ao longo da coluna de água é variável, podendo haver tanto valores muito altos no fundo e baixos na superfície quanto valores homogêneos, e que, especificamente a medição de MPS do fundo está sujeita a valores superestimados decorrente da influência do próprio equipamento de medição, por remoção do material de fundo no momento da coleta.

Os parâmetros para os modelos de silte e areia estão indicados na tabela 12 do capítulo 4. Para a modelagem de silte foi necessário fazer uma simulação prévia de duas semanas de sizígia até que fosse alcançada uma estabilização dos valores de concentração ao longo da baía. Para a modelagem de areia não foi necessário visto que a velocidade de sedimentação da areia é bem maior que a do silte e a concentração está relacionada a uma escala de tempo consideravelmente menor.

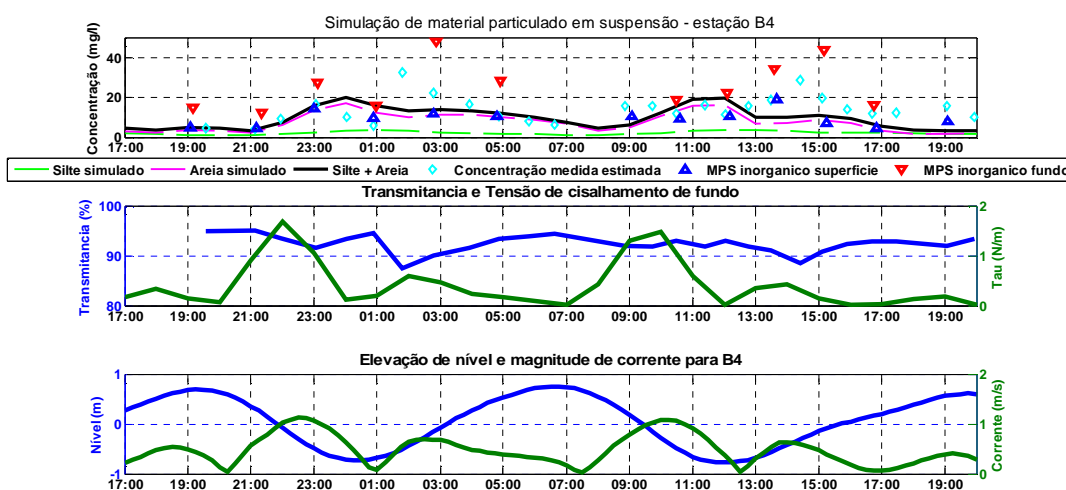
As figuras 48, 49 e 50 apresentam os resultados da modelagem de material particulado em suspensão para os pontos B4, T1 e T2, respectivamente. Cada figura apresenta três gráficos: o inferior contém a elevação de nível e a magnitude de corrente, o intermediário mostra a transmitância e a tensão de cisalhamento de fundo e no superior, as concentrações de MPS de silte e de areia simulados, a soma destas, a concentração de fundo e de superfície medidas e a concentração estimada pela regressão linear para o caso do ponto B4.

Observa-se correlação da transmitância com valores de concentração de MPS medidos somente nos gráficos de B4, em decorrência da falta de correlação entre os dados dos pontos T1 e T2.

O comportamento das concentrações de MPS de silte e areia são bem diferenciados. Em relação ao silte, cada ponto possui, de forma geral, uma concentração média e uma variação da concentração que acompanha os ciclos de maré, enquanto que a concentração de areia sofre grandes variações em poucas horas. Em geral, a curva de MPS simulada pelo modelo consegue acompanhar as concentrações de MPS medidas, tendendo a um valor intermediário entre as concentrações de superfície e fundo.

Para o ponto B4, observa-se dominância dos processos de MPS de areia. Embora os pontos simulados estejam entre as medições de MPS de fundo e superfície, ao comparar com a concentração estimada através da transmitância, verifica-se

disparidades nos períodos de enchente, quando ocorrem maiores concentrações de MPS, porém com tensão de cisalhamento bem inferior, quando comparado com os períodos de vazante. Este resultado sugere a importação de material particulado inorgânico em suspensão proveniente da área externa à baía, que por sua vez pode ter sido transportado por correntes ou resuspensos por processos turbulentos costeiros próximos à embocadura. A média do erro percentual absoluto foi de 45.2%, que embora seja um valor elevado se justifica por estar dentro da faixa de confiabilidade da regressão linear múltipla entre transmitância e concentração de MPS.



**Fig. 48 – Simulação de MPS inorgânico para o ponto B4 – sizígia.**

As simulações para os pontos T1 e T2 apresentam características similares, e em geral a curva de MPS simulado tende a acompanhar as medições de concentração de MPS.



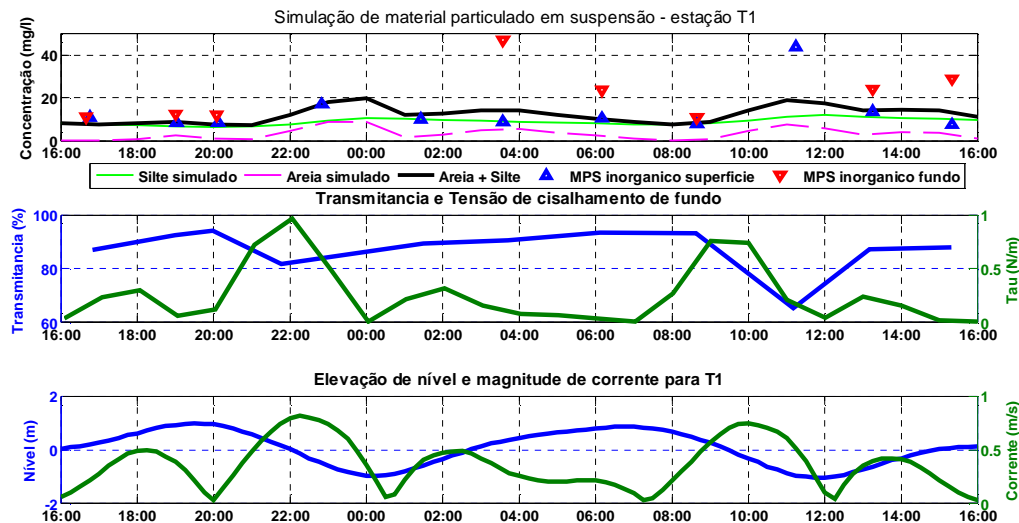


Fig. 49 – Simulação de MPS inorgânico para o ponto T1 – sizígia.

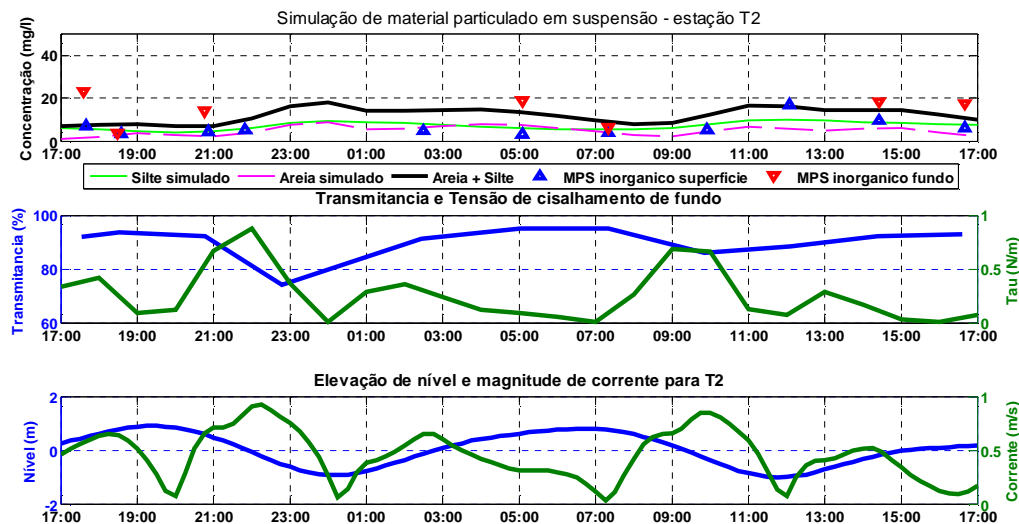
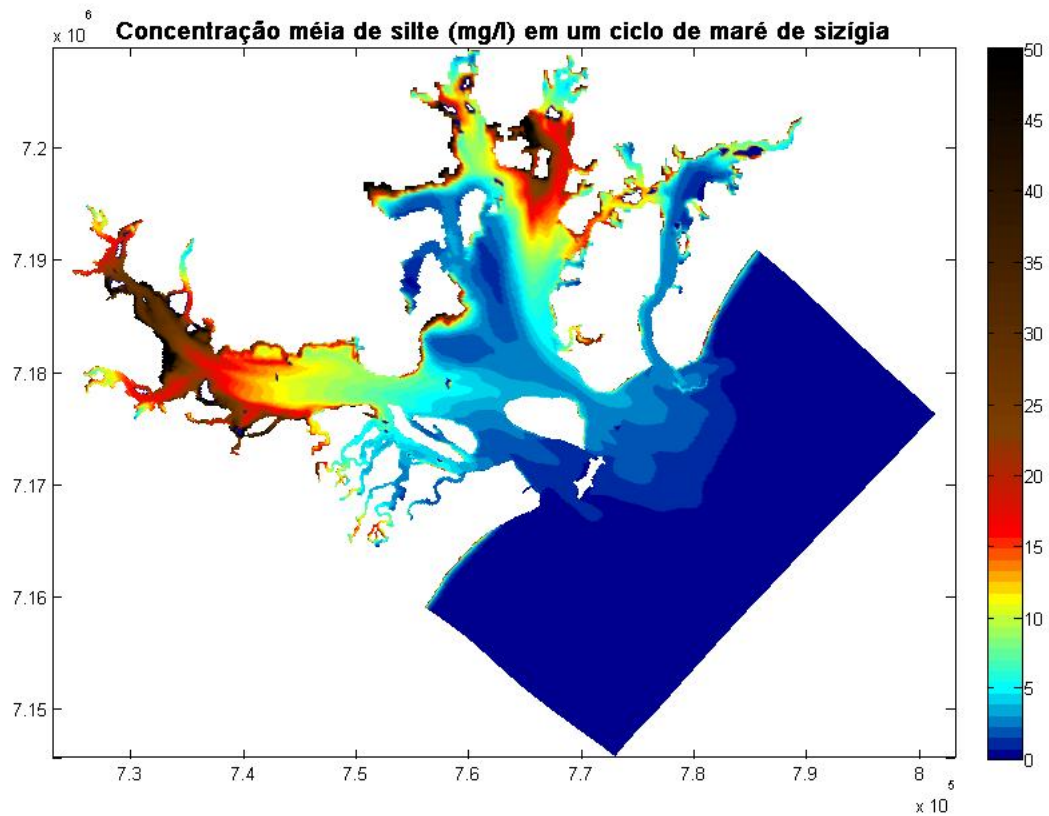


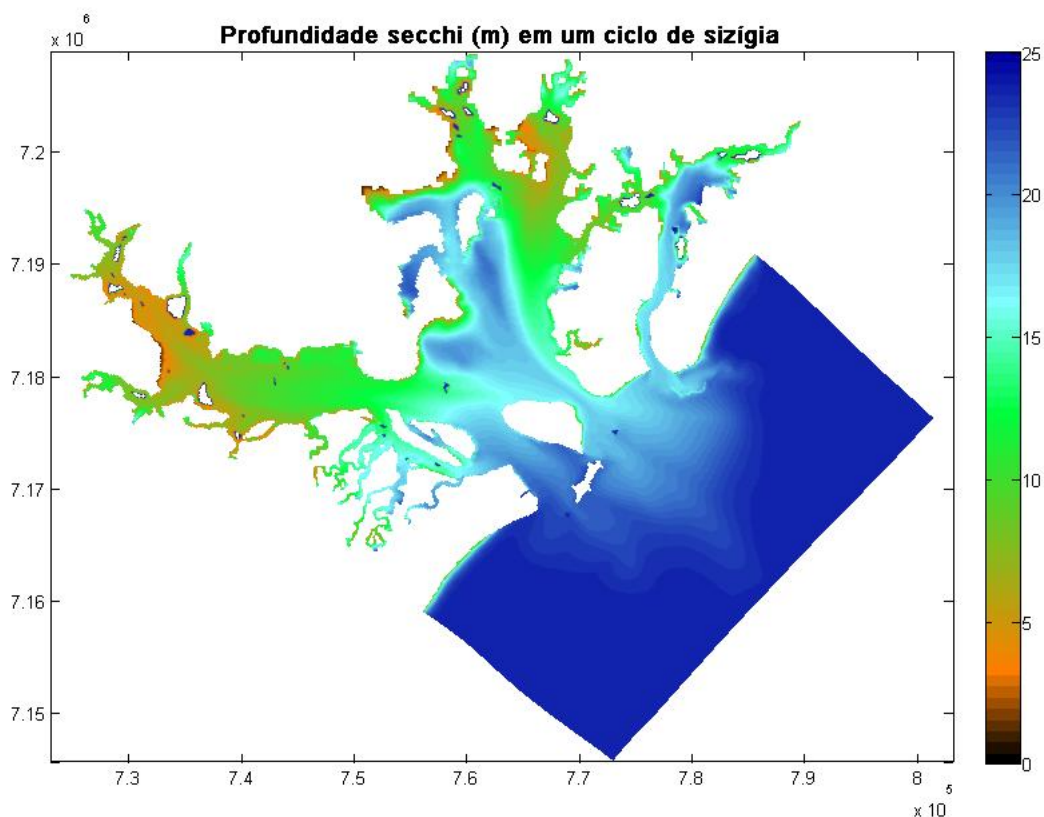
Fig. 50 – Simulação de MPS inorgânico para o ponto T2 – sizígia.

A figura 51 mostra a concentração média de silte para um ciclo completo de maré de sizígia em mg/l.



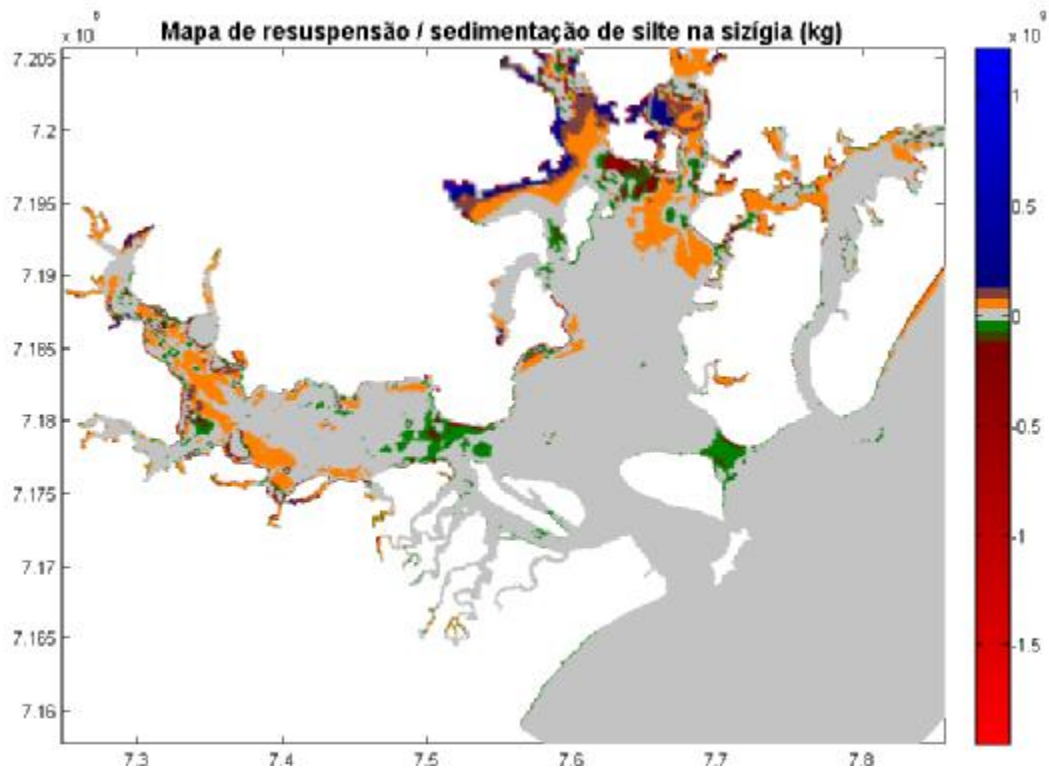
**Fig. 51 – Mapa de concentração média de silte na Baía de Paranaguá em um ciclo de maré de sizígia.**

Para avaliar a influência do silte na penetração da luz na coluna de água foi simulada a profundidade de Secchi ao longo do mesmo ciclo de sizígia em que foi calculada a média da concentração de silte ilustrada na figura 52.



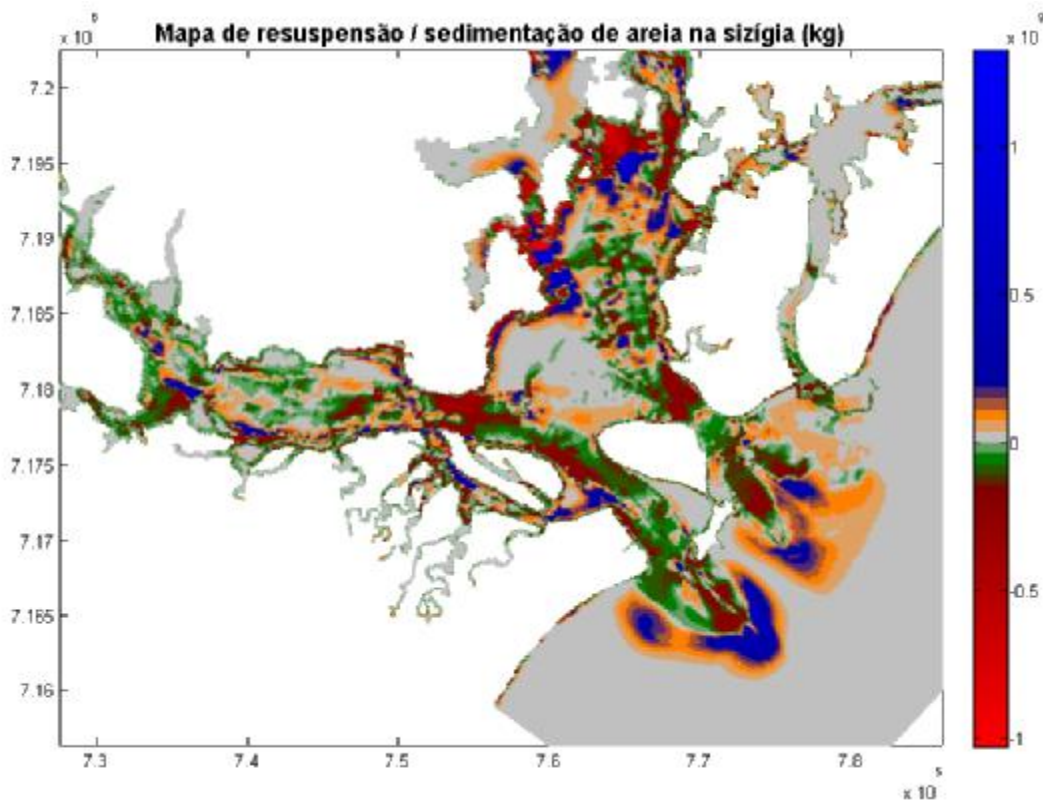
**Fig. 52 – Mapa de profundidade Secchi média silte na Baía de Paranaguá em um ciclo de maré de sizígia (m).**

Com base nas simulações realizadas no período da sizígia, foram realizados os balanços de sedimentos de fundo, através da comparação dos valores de massa de sedimento no início e no fim da simulação para silte e areia. A diferença massa entre o período final e o inicial indica os locais onde ocorreu erosão por processo de resuspensão e assoreamento por processo de sedimentação de MPS. A figura 53 apresenta o mapa de erosão para silte em um período de sizígia, tal que valores negativos (vermelho e verde) representam erosão e valores positivos (laranja e azul) representa assoreamento. Verifica-se que os principais locais de deposição coincidem com os locais onde há predominância de silte na Baía de Paranaguá.



**Fig. 53 – Mapa das principais regiões de resuspensão e sedimentação de silte em um período de sizígia.**

A figura 54 apresenta o mapa de erosão para areia fina/muito fina em um período de três dias de sizígia, tal que valores negativos (vermelho e verde) representam erosão e valores positivos (laranja e azul) representa assoreamento.



**Fig. 54 – Mapa das principais regiões de resuspensão e sedimentação de areia em um período de três dias de sizígia.**

### 5.6 Dispersão da pluma esgotos domésticos de Paranaguá

Em uma análise prévia do comportamento da pluma de esgotos na Baía de Paranaguá foram simuladas as dispersões de dois despejos simultâneos em dois pontos distintos, em torno da cidade de Paranaguá. Pela ausência de dados quantitativos, esta simulação não tem como objetivo reproduzir condições atuais reais de despejo, apenas analisar o comportamento da dispersão de esgotos no interior da Baía de Paranaguá considerando um caso hipotético de lançamento.

Os sólidos totais constituem um dos parâmetros que caracterizam águas residuárias. De acordo com o tamanho da partícula podem ser classificados em sólidos suspensos e sólidos dissolvidos. Quimicamente podem ainda ser classificados em sólidos voláteis (matéria orgânica) e sólidos fixos (matéria inorgânica). De acordo com a decantabilidade podem ainda ser classificados em sedimentáveis (capazes de sedimentar no período de uma hora) e não sedimentáveis. Em uma análise mais simplificada da dispersão, sem interferência de processos de sedimentação (caso dos sólidos em suspensão) ou decaimento biológico (caso dos voláteis), escolheu-se como parâmetro de análise os sólidos não-sedimentáveis, dissolvidos e fixos.

De maneira geral, a produção de esgotos de uma cidade corresponde aproximadamente ao seu consumo de água multiplicado por um fator que representa a fração da água consumida que adentra a rede de coleta na forma de esgoto. A vazão média de esgotos pode ser calculada segundo (Von Sperling, 1996):

$$Q_d = \frac{Pop.QPC.R}{86400} \quad \text{Eq. 42}$$

Onde:

$Q_d$	Vazão média de esgoto doméstico	l/s
$Pop$	População da cidade	hab
$QPC$	Quota per capita de água	l/hab.d
$R$	Coeficiente de retorno esgoto/água	-

Considerando a cidade de Paranaguá com 133.559 habitantes (dados do IBGE de 2007), e que a quota per capita varia entre 120 e 220 l/hab.d para cidades com população entre 50.000 e 250.000 habitantes (Von Sperling, 1996), a partir de uma regra de três simples obtém-se um valor de quota per capita para Paranaguá em torno de 161 l/hab.d. Considerando coeficiente de retorno água/esgoto de 0.8 ou 80%, obtém-se uma vazão média de esgoto doméstico para Paranaguá de 200 l/s. De acordo com Von Sperling, (1996), a concentração típica de sólidos dissolvidos fixos de esgotos domésticos brutos é de 400 mg/l.

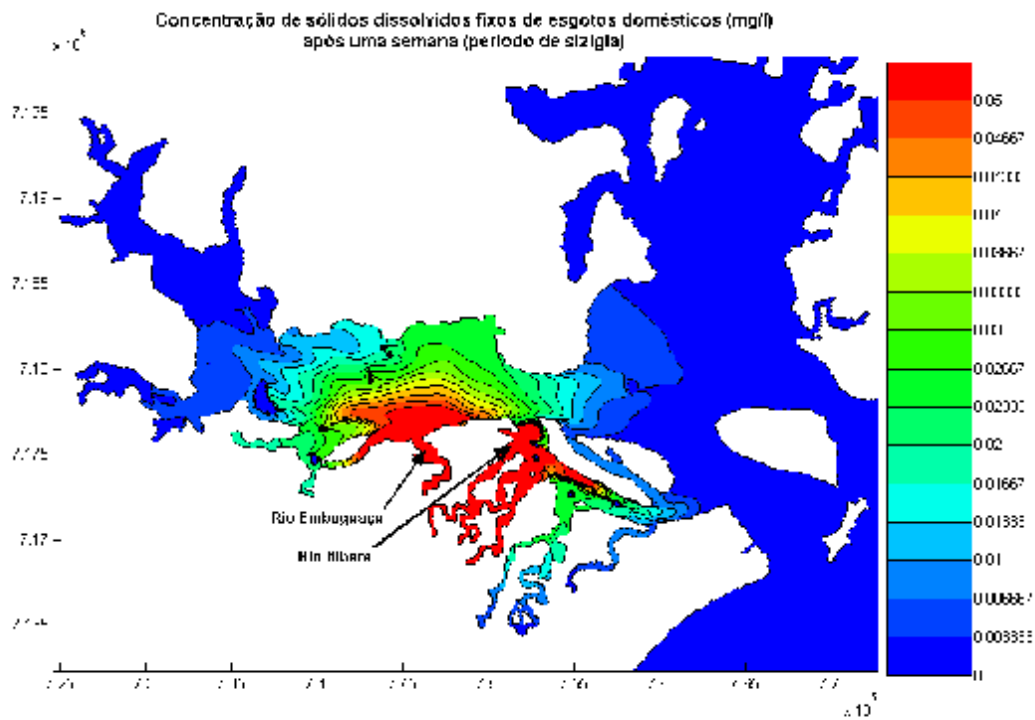
Segundo informações no site da companhia Águas de Paranaguá, responsável pelo saneamento da cidade de Paranaguá, desde que a empresa assumiu a concessão, a cidade teve expressiva melhora no serviço de atendimento de esgotos, passando de 5.000 habitantes em maio de 1997 para 34.250 habitantes em dezembro de 2006 com coleta e tratamento de esgotos, perfazendo aproximadamente 25% da população total. Os esgotos brutos não coletados podem ter destinos variados, tais como fossas, rede pluvial através de ligações irregulares e lançamentos diretos nos rios.

Com base nestes valores, estimando-se uma redução da ordem de 50% da concentração total, foi realizada uma simulação por uma semana de maré de sizígia da dispersão de sólidos dissolvidos fixos lançados em dois pontos distintos: Rio Itiberê e Rio Emboguaçu, localizados ao redor da cidade de Paranaguá, com vazão de 100 l/s e concentração de 200 mg/l, cada.

A dispersão da pluma de sólidos dissolvidos fixos está representada na figura 55. Nota-se que a pluma, inconvenientemente, se espalha mais para o interior da Baía de Paranaguá que para o exterior.

A pluma referente ao lançamento do Rio Itiberê se espalha pelos canais de maré ao sul da Ilha Rasa da Cotinga, que por serem ambientes com baixas velocidades e fracas capacidades de oxigenação, tornam ambientes propícios a altos índices de contaminação.

A pluma referente ao lançamento do Rio Emboguaçu se propaga preferencialmente para a parte frontal do Porto de Paranaguá e para o interior, na baía de Antonina. Observando-se as figuras 44 e 45 que indicam o percentual de tempo com tensão de cisalhamento de fundo superiores à uma tensão crítica de resuspensão, observa-se que a região frontal ao Porto de Paranaguá possui tensões de cisalhamento e portanto, locais propícios para sedimentação de partículas. A existência de metais em despejos industriais, por exemplo, lançados ao redor da cidade de Paranaguá favorecem a adsorção destes metais ao material em suspensão e a posterior sedimentação e contaminação do sedimento nesta área. Esta análise está em concordância com o estudo de Sá (2003) que relata maiores concentrações de arsênio localizadas nesta região.



**Fig. 55 – Dispersão da pluma de sólidos dissolvidos fixos provenientes de esgotos domésticos (mg/l). Os pontos de lançamento estão indicados pelas setas.**

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Com uso do software de modelagem Delft3d foram realizadas diversas simulações hidrodinâmicas e de qualidade da água para a Baía de Paranaguá. O período em estudo (setembro de 2007) caracterizou-se por baixa descarga fluvial, ausência de precipitação, baixa variação térmica e ventos fracos. Os resultados encontrados devem ser analisados considerando as características físicas relatadas, um sistema dominado por marés e com pouca influência de forçantes de ventos e descarga fluvial.

Primeiramente, os dados da campanha de setembro de 2007 foram utilizados para calibração do modelo hidrodinâmico bidimensional forçado por constituintes astronômicas, através de comparações entre simulações e medições de elevações de nível e corrente. Diferentes coeficientes de Chèzy foram analisados e optou-se por manter um valor de  $90 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  para a baía. Foram encontrados resultados melhores para o período de sizígia e erros maiores para o período da quadratura, influenciado por oscilações de nível decorrentes de constituintes não lineares de maré. Para a sizígia, as medianas dos erros médios de todos transectos (Pontal – Ilha do Mel) da magnitude e direção de corrente foram de  $0.09 \text{ m/s}$  e  $29.3$  graus, respectivamente.

Com uso dos resultados hidrodinâmicos, foi averiguado o balanço de massas de água para os períodos de sizígia e quadratura da Baía de Paranaguá. Verificaram-se comportamentos distintos para os dois períodos, com características de importação ou retenção de massas de água na sizígia e exportação de massas de água na quadratura. Computando o valor acumulado de vazão para o transsecto Ilha do Mel – Ponta do Poço, verificou-se que durante a sizígia, no canal Sul de acesso à baía, o volume de água que entra na baía é superior ao volume que sai, e no transecto entre Ilha do Mel e Piaçaguera ocorre o inverso.

Com uso do Delft3D-FLOW foram realizadas simulações de salinidade e temperatura para o período de setembro e os resultados encontrados alcançaram boas correlações com as medições, embora ainda seja necessário aplicar o modelo de temperatura para períodos de maior variabilidade termal para efeito de calibração do modelo.

Para análise das escalas de tempo relacionadas aos processos de mistura na Baía de Paranaguá foi calculado o prisma de maré ( $2,84 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) e o tempo de descarga para os períodos de quadratura (107 dias) e sizígia (132 dias). Através destes valores se



verificou que as escalas de tempo envolvidas no sistema são dinâmicas, podendo haver alta variabilidade conforme características das forçantes de maré e descarga fluvial.

Com uso do Delft3D-WAQ foram ainda realizadas simulações do tempo de residência médio para 3 dias de sizígia e simulações para o mesmo período de idade da água de elementos traço lançados em pontos particulares na baía (Rio Nhundiaquara, Rio Guaraqueçaba, Porto de Paranaguá e Ponta do Poço). Através destas análises verificou-se que nestes locais no período da sizígia elementos traço podem se dispersar e se confinar em águas interiores da baía ao invés de serem exportadas para a plataforma continental interna. Foi realizado um teste de um ponto alternativo de lançamento (na beirada do canal, logo em frente à Ponta do Poço) com resultados bem melhores de dispersão e exportação de elementos traço. Testes equivalentes podem ser realizados para diferentes condições de forçantes físicas a fim de minimizar impactos ambientais decorrentes das diversas atividades econômicas atuais e futuras da baía.

Com uso do Delft3D-FLOW foram realizados diversos testes com derivadores para tentar analisar o destino, em decorrência de processos advectivos, de substâncias hipoteticamente introduzidas em alguns pontos da baía. Alguns padrões para algumas destas regiões foram averiguados.

Com uso do Delft3D-WAQ foram realizadas simulações de material particulado em suspensão para silte e areia e simulação de transporte de fundo de sedimentos não coesivos para o período da sizígia, com boas correlações entre valores medidos e simulados. A partir destes resultados, foram mostrados os mapas de concentração média de silte para um ciclo de maré de sizígia, e os mapas de resuspensão/sedimentação para silte e areia em período de sizígia.

A modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água mostrou-se uma boa ferramenta para compreensão dos processos de mistura e dispersão da Baía de Paranaguá e avaliação das escalas de tempo envolvidas. Análises de dispersão e mistura de elementos traço podem indicar pontos alternativos de lançamento de despejos para minimizar os impactos ambientais na baía.

A Política Nacional de Recursos Hídricos tem como um dos instrumentos a outorga de direito de uso, necessária para todo usuário que usufruir ou alterar significativamente de forma quantitativa ou qualitativa um corpo de água. Os resultados deste estudo indicam que os padrões de lançamento de despejos permitidos para diluição de poluentes em corpos de água de dinâmica complexa, tais como regiões estuarinas e costeiras, não podem ser baseados somente em um padrão fixo de descarga aplicado a todo seu domínio, mas também deve ser dependente da localização do despejo no corpo de água.

Os resultados encontrados para idade da água e tempos de residência na Baía de Paranaguá ao longo de sua extensão indicam a relação entre a carga de despejo de e o local de despejo, de forma que, enquanto algumas regiões permitem descargas maiores de poluentes com mínimo prejuízo ao ecossistema, em outras, descargas reduzidas são potencialmente poluidoras a longo prazo. As fontes de despejo devem ser simuladas individualmente e conjuntamente considerando-se diferentes cenários em escalas de tempo suficientes para atingir condições de concentração estacionárias ao longo da coluna de água.

Além da determinação ótima do ponto de despejo, com uso de reservatórios e previsões de maré, pode-se condicionar o despejo a períodos específicos de vazante como alternativa para minimizar possíveis impactos ambientais.

Para viabilizar o uso múltiplo das águas, deve ser considerada não somente a dispersão de poluentes na coluna de água, mas também a contaminação de sedimentos via transporte e sedimentação de poluentes adsorvidos por material particulado em suspensão. Regiões sem nenhum ponto de despejo próximo podem ter sedimentos contaminados por metais provenientes de regiões distantes e conflitar com usos locais, tais como aquicultura, recreação, etc.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Para novos estudos em modelagem seria apropriado realizar um novo levantamento batimétrico da Baía de Paranaguá. Os dados atuais provem de fontes diversas e algumas destas defasadas. A quantificação do aporte fluvial também merece atenção, a fim da viabilização da disponibilidade dos dados de vazão não somente dos rios principais rios, mas também da contribuição dos menos influentes.

Alguns trabalhos em modelagem aplicada à Baía de Paranaguá podem ser sugeridos:

- Aplicar a modelagem para escalas de tempo maiores com dados disponíveis de vazão fluvial e vento para verificar as variações sazonais das características de mistura e dispersão para a Baía de Paranaguá;
- Com relação à modelagem de material particulado em suspensão, ainda demandam estudos considerando mais divisões de diâmetro de sedimentos, e inclusão do processo de floculação a fim de verificar a ocorrência da zona de máxima turbidez. Também é necessário ainda analisar a influencia dos ventos nos processos de resuspensão e sedimentação envolvidos;

- A modelagem de transporte de sedimentos não coesivos de fundo precisaria ser aplicada para maiores escalas de tempo para verificar o transporte de areia no interior da Baía de Paranaguá e na desembocadura;
- Calibrar e validar um modelo hidrodinâmico tridimensional para os dados da campanha realizada em fevereiro de 2008, a fim de verificar as características de dispersão vertical na baía;
- Desenvolvimento de um modelo de plataforma continental interna forçados por ondas, ventos e marés e através de um nesting utilizar as variações de nível com entrada do modelo hidrodinâmico da Baía de Paranaguá;
- Um modelo costeiro seria bastante útil na verificação de dispersão de poluentes e transporte de sedimentos ao longo da costa paranaense;
- Considerar no cálculo da tensão de cisalhamento de fundo a tensão de cisalhamento decorrente de ondas de superfície e de movimentação de embarcações e suas influencias no transporte de sedimentos;
- Considerar a influência dos manguezais no fluxo hidrodinâmico e na retenção de constituintes;
- Modelagem de qualidade da água de nutrientes, gases e compostos orgânicos na coluna de água considerando os fluxos de propriedades entre água e sedimento;
- Modelagem da qualidade da água para qualificar e quantificar o impacto da poluição difusa na Baía de Paranaguá, principalmente nos arredores das cidades de Paranaguá, Morretes em Antonia proveniente da drenagem de águas urbanas na ocorrência de chuva.

Os resultados de modelagem também podem indicar procedimentos futuros de medições visando um melhor entendimento da área e consequentemente o refinamento do próprio modelo. Para estudo do transporte de sedimentos, por exemplo, seriam muito úteis medições de turbidez em estações fixas ao longo da maré em locais onde haja predominância de um determinado sedimento, para avaliar as tensões críticas de cisalhamento de fundo de resuspensão e sedimentação que melhor se adaptem à modelagem do sedimento em questão.

Os resultados de tempo de residência e idade da massa de água identificam locais de baixa renovação de água, onde seriam interessantes medições de propriedades químicas para avaliação da qualidade da água locais.

Nos ambientes na zona da boca estuarina, com predominância de areia, encontrou-se alta correlação entre concentração de material particulado em suspensão orgânico e

inorgânico, e boas correlações entre medições de transmitância e concentração de material particulado em suspensão inorgânico, fato que favorece o uso de equipamento com sensores de turbidez ou transmitância nestas regiões. No entanto, à medida que se percorre as zonas mais internas (mediana e superior) as correlações entre concentração de material particulado em suspensão orgânico e inorgânico se enfraquecem, bem como as correlações entre medições de transmitância e concentração de material particulado em suspensão inorgânico. Seria importante para estas regiões, mais medições de concentração de MPS ao longo da coluna de água para melhor análise e comparação entre medições e simulações.

## REFERÊNCIAS

Águas de Paranaguá S/A. Disponível em: <http://www.aguasdeparanaqua.com.br>  
Acesso em 5 de janeiro de 2009.

ANDRIGUETTO-FILHO, J.M., 1993. **Institutional prospects in managing coastal environmental conservation units in Paraná State, Brazil**. Coastal Zone 93, vol 1. Proc 8<sup>th</sup> Symp Coastal Ocean Manag 1993. Am Soc Civil Eng, New Orleans.

ANGULO RJ. 1993. **Morfologia e gênese das dunas frontais do litoral do Estado do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, 23: 68-80.

ANGULO, R.J., 1999. **Morphological Characterization of the tidal deltas on the coast of the State of Paraná**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 71(4, Part 2), p. 935-959.

ARAÚJO FILHO, M. C. **Modelagem matemática de ecossistemas aquáticos**. In: ESKINAZI-LEZA, E., NEUMANN-LEITÃO, S., DA COSTA, M. F. 2004. **Oceanografia um cenário tropical**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

BIGARELA, J.J., BECKER, R.D., MATTOS, D.J., WERNER, A., 1978. **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná, um problema de segurança ambiental e nacional**. Secretaria do Estado do Planejamento do Paraná, 248pp.

BOLDRINI, E.B., ROCHA, A.C., YASSUDA, E., TOMINAGA, E.N.S, CORRÊA, M.A., GUIMARÃES, M.R.F., LAMMARDO, M.P., GELLATI, C.L.B., 2008. **Modelagem numérica da hidrodinâmica e áreas de despejo de material dragado no estuário do Paranaguá: ilhas artificiais**. In: Boldrini, E.B., Soraes, C.R., Paula, E.V., (Org). Dragagens portuárias no Brasil: engenharia, tecnologia e meio ambiente. Antonina, Associação de Defesa do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Antonina (ADEMADAN)/Faculdades Integradas Espírita (UNIBEM)/Secretaria de Ciência e Tecnologia para Inclusão Social (MCT), 296p.

BOWDEN, K.F. **Physical factors: salinity, temperature, circulation, and mixing processes**. In: OLAUSSON, E., CATO, I., 1980. **Chemistry and biochemistry of estuaries**. Ed John Wiley & Sons Ltd.

BRANDINI, F. P., 1985b. **Seasonal succession of the phytoplankton in the Bay of Paranaguá (Paraná State – Brazil)**. Revista Brasileira de Biologia, Rio de Janeiro, v. 45, n. 4, p. 687-694.

BRANDINI, F.P., 1985a. **Ecological studies in the Bay of Paranaguá. I. Horizontal distribution and seasonal dynamics of the phytoplankton**. Bolm Inst. Oceanogr., S.

Paulo, 33(2):139-147.

Comissão nacional independente sobre os oceanos, 1999. **O oceano. Nosso futuro.** Fundação Mario Soares. Rio de Janeiro, 247p.

CROSSLAND, C. J., KREMER, H. H., LINDEBOOM, H. J., CROSSLAND, J. I. M., LE TISSIER, M. D. A. 2005. **Coastal fluxes in the anthropocene**, editora Springer, Berlin.

CUNHA, C. L. N.; ROSMAN, P. C. C.; FERREIRA, A. P.; MONTEIRO, T. C N. 2006. **Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay.** Continental Shelf Research 26(2006) 1940-1953.

DE PAULA, E.V., CUNICO, C., 2007. **O assoreamento das baías de Antonina e de Paranaguá e a gestão de suas bacias hidrográficas.** In: Boldrini, E.B., Soraes, C.R., Paula, E.V., (Org). Dragagens portuárias no Brasil: licenciamento e monitoramento ambiental. Antonina, Governo do Estado do Paraná/Secretaria de estado do meio ambiente do Estado do Paraná(SEMA/PR)/Associação de Defesa do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Antonina (ADEMADAN)/Faculdades Integradas Espírita (UNIBEM), 312p.

DIETRICH, E., 2008. **Setup of a morphodynamic model of Paranaguá Bay, Brazil.** Kiel – Alemanha, 83f. Dissertação de Mestrado – Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel, Alemanha.

DYER, K., 2000. **Fluxes of suspended sediment in estuaries, and their relationship to equilibrium morphology.** In: Modelling estuary morphology and processes – final report. Estuaries Research Programme, phase 1. Research by Enphasys Consortium for MAFF Project FD1401.

DYER, K.R., 1973. **Estuaries: a physical introduction.** John Wiley&Sons, Sydney, 140p.

ENGELUND, F., HANSEN, E., 1967. **Monograph on sediment transport in natural streams.** Teknisk Forlag, Copenhagen.

FALCONER, R., LIN, B., 1996. **Three-dimensional modelling of water quality in the Humber Estuary.** Water Resources vol. 31, No. 5, pp. 1092-1102.

GERRITSEN, H., VOS, R.J., VAN DEER KAAKI, T., Lane, A., Boon, J.G., 2000. **Suspended sediment modeling in a shelf sea (North Sea).** Coastal Engineering 41 (2000) 317-352.

HARDISTY, J., 2007. **Estuaries: monitoring and modeling the physical system.** Blackwell publishing, UK, 157 pp.

- HAYATININGSIH, I., 2006. **Development of a three dimensional flow model for Paranaguá Bay in Brazil**. Kiel – Alemanha, 98f. Dissertação de Mestrado – Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel, Alemanha.
- HAYATININGSIH, I., 2007. **Development of a water quality model for Paranaguá Bay**. Kiel – Alemanha, 98f. Report – Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel, Alemanha.
- HERRLING, G., 2003. **Development of a numerical model for the Paranaguá Bay in Brazil**. Kiel – Alemanha, 106f. Dissertação de Mestrado – Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel, Alemanha.
- IPARDES, 1989. **Zoneamento do litoral paranaense. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social**. Fund. Édison Vieira. Curitiba, Julho de 1989. 176pp
- KETCHUM, B. H. 1983. **Estuaries and Enclosed Seas**. Elsevier. 500p. (Ecosystems of the world), Amsterdam.
- KNOPPERS, B.A., BRANDINI, F.P., THAMM, C.A. 1987. **Ecological studies in the Paranaguá Bay II. Some physical and chemical characteristics**. Nerítica 2:1-36.
- KRONE, R.B., 1962. **Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes, Final report**. Universidade da Califórnia, Hydraulic Engineering and Sanitary Engineering Laboratory, Berkeley, Califórnia, EUA.
- LAMOUR, M.R.; SOARES, C.R.; CARRILHO, J.C., 2004. **Mapas dos parâmetros texturais dos sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR**. Boletim Paranaense de Geociências. n 55.
- LANA, P.C., MARONE, E., LOPES, R.M., MACAHDO, E.C., 2001. **The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil**. In: Sellinger, U., Kjerfve, P. eds. Ecological Studies, v. 144 – Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg p. 131-145.
- LESSA, G.C., ANGULO, R.J., 1995. **A framework for the stratigraphy and evolution of the Paranaguá coastal plain – Paraná, Brazil: II Congresso da Associação Brasileira para Estudos do Quaternário (ABEQUA), Niterói, RJ, Anais, p. 92-98**.
- LESSA, G.C., MEYERS, S.R., MARONE, E. 1998. **Holocene stratigraphy in the Paranaguá Bay Estuary, southern Brazil**. Journal of Sedimentary Research Section B - Stratigraphy and Global, EUA, v. 68, n. 6, p. 1060-1076.
- LOPES, R.M., VALE, R., BRANDINI, F.P., 1998. **Composição, abundância e**

**distribuição espacial do zooplâncton no complexo estuarino de Paranaguá durante o inverno de 1993 e o verão de 1994.** Ver. Bras. de Oceanogr., 46:195-211.

LUNG, W. 1993. **Water quality modeling: application to estuaries, vol III.** CRC Press, Florida.

MANTOVANELLI, A., 1999. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão da Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem.** Curitiba, 149 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

MARONE, E., CAMARGO, R., 1994a. **Efeitos de maré meteorológica na Baía de Paranaguá, PR.** Nerítica, 8(1-2):p.73-85.

MARONE, E., CAMARGO, R., 1994b. **Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993.** Nerítica v. 8(1-2) p. 73-85.

MARONE, E., GUIMARÃES, M.R., PRATA JR, V.P., KLINGENFUSS, M.S., CAMARGO, R., 1995. **Caracterização física das condições oceanográficas, meteorológicas e costeiras das zonas estuarinas da Baía de Paranaguá, PR.** VI Congresso Latinoamericano de Ciências del Mar. Mar del Plata, Argentina.

MARONE, E., JAMIYANAA, D., 1997. **Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the estuarine complex of the Bay of Paranaguá.** Nerítica v. 11 p. 95-107.

MARONE, E., MACHADO, E.C., LOPES, R.M., DA SILVA, E.T. 2005. **Land-ocean fluxes in the Paranaguá Bay Estuarine System, southern Brazil.** Brazilian Journal of Oceanography, São Paulo, v. 53, n. ¾, p. 169-181.

MAYERLE, R., 2008. **Decision support systems for sustainable harbour management.** In: Boldrini, E.B., Soraes, C.R., Paula, E.V., (Org). Dragagens portuárias no Brasil: engenharia, tecnologia e meio ambiente. Antonina, Associação de Defesa do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Antonina (ADEMADAN)/Faculdades Integradas Espírita (UNIBEM)/Secretaria de Ciência e Tecnologia para Inclusão Social (MCT), 296p.

MCLUSKY, D.S., 1981. **The Estuarine Ecosystem.** Ed Thomson Litho Ltd, East Kilbridge, Scotland.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. **Ecosystems and human well-being: current state and trends, vol. 1.** Island Press, Washington.

Ministério do Meio Ambiente – Secretaria de Recursos Hídricos, 2000. **Termos de referência para elaboração dos planos de recursos hídricos** (documento básico).



- MIRANDA, L. B. Cinemática e dinâmica de estuários. São Paulo: Instituto Oceanográfico da USP – IOUSP, 2007. (notas de aula)
- MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M., KJERFVE, B. 2002. **Princípio de oceanografia física de estuários**. São Paulo, edusp, 414p.
- MONTEIRO, P.M.S., LUGER, S., PRETORIUS, P.J., VAN BALLEGOOYEN, R., 1999. **Numerical modelling of eutrophication and particle dynamics in Saldanha Bay in order to predict the transport and fate of trace metals using the Delft3D-FLOW and -WAQ models**. Proceedings Pollution 99, Grécia, maio de 1999.
- NOERNBERG, M. A., 2001. **Processos morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá: um estudo utilizando os dados de Landsat-TM e medições *in situ***. Curitiba, PR, 118 f. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Federal do Paraná – UFPR.
- NOVIKOV, A.; BAGTZOGLOU, A. C. 2006. **Hydrodynamic model of the Lower Hudson River Estuarine System and its application for water quality management**. Water Resources Management (2006) 20:257-276.
- PARTHENIADES, E., 1962. **A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water**. Tese de doutorado, Universidade de Califórnia, EUA.
- PEREIRA, R. S.; NIENCHESKI, L. F. H. **Avaliação da água na Lagoa dos Patos a partir de um modelo matemático**. In: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2004, Rio Grande. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Rio Grande: FURG.
- PHILLIPS, N.A., 1957. **A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting**. Journal of Meteorology, vol. 14, 1957.
- PROCOPIAK, L.K., DOS REIS, D.T., SCHROEBER FILHO, G.P., SANTANA FILHO, V., ROBERT, M.C., 2007. **Uso e ocupação do solo na orla marítima no município de Antonina e poluição no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP)**. In: Boldrini, E.B., Soraes, C.R., Paula, E.V., (Org). Dragagens portuárias no Brasil: licenciamento e monitoramento ambiental. Antonina, Governo do Estado do Paraná/Secretaria de estado do meio ambiente do Estado do Paraná(SEMA/PR)/Associação de Defesa do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Antonina (ADEMADAN)/Faculdades Integradas Espírita (UNIBEM), 312p.
- REZENDE, K.R.V., 1995. **Dinâmica temporal do fitoplâncton de zona de arrebentação da Praia de Pontal do Sul (Paraná)**. São Paulo, 130 f. Dissertação (mestrado em Oceanografia Biológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

RIBAS, T.M., 2004. Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das Baías de Antonina e Paranaguá – PR. Curitiba, 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Sá, F., 2003. **Distribuição e fracionamento de contaminantes nos sedimentos superficiais e atividades de dragagem no Complexo Estuarino de Paranaguá, PR.** Dissertação de mestrado apresentada no curso de Pós-graduação em geologia – UFPR, 92p.

SOARES, C.R., LAMOUR, M.R., 2008. **Atividade portuária na Baía de Paranaguá (PR): histórico e características da navegação, canais de acesso, berços de atracação, bacias de evolução e áreas de fundeio.** In: Boldrini, E.B., Soraes, C.R., Paula, E.V., (Org). Dragagens portuárias no Brasil: engenharia, tecnologia e meio ambiente. Antonina, Associação de Defesa do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Antonina (ADEMADAN)/Faculdades Integradas Espírita (UNIBEM)/Secretaria de Ciência e Tecnologia para Inclusão Social (MCT), 296p.

SOARES, C.R., MARONE, E., 1997. Relatório Consolidado – Convênio APPA-CEM. Curitiba. 580p.

SOUZA,A.J., DICKEY, T.D., CHANG, C.G., 2001. **Modeling water column structure and suspended particulate matter on the Middle Atlantic continental shelf during the passages of Hurricanes Edouard and Hortense.** Journal of Marine Research, 59, 1021-1045, 2001.

SOWA/RIZA, 1999. **Good Modelling practice handbook.** STOWA report 99-05, Dutch dept. of Public Works, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment report 99.036, ISBN 90-5773-056-1, Holanda.

STRICKLAND J. L. H. & PARSONS T. R. 1972. **“A Practical Handbook of Seawater Analysis.”** Bull. Fish Res. Board Can., 167 p.

TUCCI, C. E. M. 1998. **Modelos Hidrológicos.** Ed. Universidade/UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.

UNCLES, R.J., LAVENDER, S.J., STEPHENS, J.A., 2001. **Remotely sensed observations of the turbidity maximum in the highly turbid Humber Estuary, UK.** Estuaries, 24, 745-755.

VAN RIJN. L.C., 1993. **Principles of sediment transport in Rivers, estuaries and coastal seas.** Aqua Publications, Holanda.

Von Sperlin, M. 1996. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.

Segunda edição – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG.

WL | Delft Hydraulics, 2005. **Delft3D – WAQ Detailed description of processes – Technical reference manual**. Delft, Holanda.

WL | Delft Hydraulics, 2006a. **Delft3D – GPP User Manual**. Delft, Holanda.

WL | Delft Hydraulics, 2007a. **Delft3D – FLOW User Manual**. Delft, Holanda.

WL | Delft Hydraulics, 2007b. **Delft3D – WAQ User Manual**. Delft, Holanda.

WL | Delft Hydraulics, 2007c. **Delft3D – Quickin User Manual**. Delft, Holanda.

WRIGHT, A., NORTON, P., 2000. **Inter-comparison between one, two and three-dimensional numerical models**. In: Modelling estuary morphology and processes – final report. Estuaries Research Programme, phase 1. Research by Enphasys Consortium for MAFF Project FD1401.

XIA, X.M., LI, Y., YANG, H., WU, C.Y., SING, T.H., PON, H.K., 2004. **Observations on the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Pearl River Estuary, China**. Continental Shelf Research 24 (2004) 1809-1826.

## APÊNDICE A – FORMULAÇÃO DA MODELAGEM

### HIDRODINÂMICA NO DELFT3D-FLOW

O módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW soluciona as equações de águas rasas bidimensionais verticalmente integradas (2DH) ou tridimensionais (3D), consistindo em um sistema de equações da conservação de quantidade de movimento, da continuidade e do transporte para constituintes conservativos. As equações são formuladas em coordenadas curvilíneas ortogonais, sendo suportado o uso de coordenadas cartesianas ou coordenadas esféricas (WL | Delft Hydraulics, 2007a). Coordenadas esféricas são um caso especial de coordenadas curvilíneas, tal que:

$$\begin{aligned} x &= l \\ h &= f \\ \sqrt{G_{xx}} &= R \cos f \\ \sqrt{G_{hh}} &= R \end{aligned} \quad \text{Eq. 43}$$

Onde:

- $l$  : coordenada longitude em coordenadas esféricas
- $f$  : coordenada latitude em coordenadas esféricas
- $x, h$  : coordenadas curvilíneas horizontais
- $R$  : raio da Terra (6378.137 km)

Como forçantes, são consideradas as marés e as descargas fluviais nos contornos abertos, fricção do vento na superfície livre, gradientes de pressão em decorrência de gradientes de pressão em superfície livre (barotrópico) ou gradientes de densidade (baroclínico).

O módulo Delft3D-FLOW soluciona as equações de Navier-Stokes para fluídos incompressíveis para águas rasas utilizando a hipótese de Boussinesq. Na equação da quantidade de movimento da componente vertical as acelerações verticais são desprezadas, reduzindo-se à equação do equilíbrio hidrostático. O modelo utiliza na direção vertical o sistema de coordenadas  $\sigma$  (sigma) introduzido para modelos atmosféricos por (Phillips, 1957) através da transformação da profundidade em uma quantidade adimensional com valores entre 0 e -1 representada proporcionalmente entre dois planos não estritamente horizontais que seguem a topografia de fundo e a superfície livre, (WL | Delft Hydraulics, 2007a). A coordenada  $\sigma$  é definida como:

$$S = \frac{z - V}{d + V} = \frac{z - V}{H} \quad \text{Eq. 44}$$

Onde:

- $z$ : Coordenada vertical no espaço físico
- $V$ : Elevação da superfície livre acima do plano de referência ( $z=0$ )
- $d$ : Profundidade da coluna de água abaixo do plano de referência
- $H$ : Profundidade total da coluna de água, dada por:

$$H = d + V \quad \text{Eq. 45}$$

A equação da continuidade verticalmente integrada é representada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{xx}} \sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial [(d + V)U \sqrt{G_{hh}}]}{\partial x} + \\ + \frac{1}{\sqrt{G_{xx}} \sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial [(d + V)V \sqrt{G_{xx}}]}{\partial h} = Q \end{aligned} \quad \text{Eq. 46}$$

Onde:

- $t$ : Tempo
- $U$ : Velocidade integrada na vertical na direção  $x$
- $V$ : Velocidade integrada na vertical na direção  $h$
- $Q$ : Contribuição por unidade de área das vazões de entrada e saída

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) dS + P - E \quad \text{Eq. 47}$$

Onde:

- $q_{in}$ : Fonte local de água por unidade de volume
- $q_{out}$ : Sorvedouro local de água por unidade de volume
- $P$ : Fonte de água decorrente da precipitação
- $E$ : Sorvedouro de água decorrente da evaporação

A seguir, a equação da quantidade de movimento na direção horizontal  $x$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial u}{\partial h} + \frac{w}{d+V} \frac{\partial u}{\partial s} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial \sqrt{G_{hh}}}{\partial x} + \frac{uv}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial \sqrt{G_{xx}}}{\partial h} - fv = \\ - \frac{1}{r_0 \sqrt{G_{xx}}} P_x + F_x + \frac{1}{(d+V)^2} \frac{\partial}{\partial s} (u_v \frac{\partial u}{\partial s}) + M_x \end{aligned} \quad \text{Eq. 48}$$

Onde:

- $u$ : velocidade na direção  $x$
- $v$ : velocidade na direção  $h$
- $w$ : velocidade na direção  $s$
- $r_0$ : densidade da água de referência
- $f$ : parâmetro de Coriolis (frequência inercial)
- $P_x$ : gradiente de pressão hidrostática na direção  $x$
- $F_x$ : Fluxo de momentum turbulento na direção  $x$
- $M_x$ : fonte ou sorvedouro de momento na direção  $x$
- $u_v$ : coeficiente de viscosidade turbulenta vertical

A seguir, a equação do momentum na direção horizontal  $h$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial v}{\partial h} + \frac{w}{d+V} \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{uv}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial \sqrt{G_{hh}}}{\partial x} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial \sqrt{G_{xx}}}{\partial h} + fu = \\ - \frac{1}{r_0 \sqrt{G_{hh}}} P_h + F_h + \frac{1}{(d+V)^2} \frac{\partial}{\partial s} (u_v \frac{\partial v}{\partial s}) + M_h \end{aligned} \quad \text{Eq. 49}$$

Onde:

- $P_h$ : Gradiente de pressão hidrostática na direção  $h$
- $F_h$ : Fluxo de momentum turbulento na direção  $h$
- $M_h$ : fonte ou sorvedouro de momento na direção  $h$

A velocidade vertical  $w$  na coordenada sigma é calculada a partir da equação da continuidade:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial [(d+V)u\sqrt{G_{hh}}]}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial [(d+V)v\sqrt{G_{xx}}]}{\partial h} + \frac{\partial w}{\partial s} = H(q_{in} - q_{out}) \quad \text{Eq. 50}$$

E a equação do momentum vertical para equações de águas rasas e assumindo-se a condição de pressão hidrostática é representada por:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad \text{Eq. 51}$$

Onde:

- P: pressão hidrostática da água

Após integração na vertical, a pressão total é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_s^0 r(x, h, s', t) ds' \quad \text{Eq. 52}$$

Onde:

- $P_{atm}$  : pressão atmosférica

Pode-se considerar pressão da água como sendo constante (condição barotrópica) incluindo-se no sistema a pressão atmosférica para simular eventos de tempestade. Em caso de densidade não uniforme (condição baroclínica), a densidade local é relacionada com alterações na temperatura e salinidade através da equação de estado. A partir da regra de Leibnitz, obtêm-se as seguintes expressões para os gradientes de pressão horizontal:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_0\sqrt{G_{xx}}} P_x &= \frac{g}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{d+V}{r_0\sqrt{G_{xx}}} \int_s^0 \left( \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} \right) ds' \\ \frac{1}{r_0\sqrt{G_{hh}}} P_h &= \frac{g}{\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial V}{\partial h} + g \frac{d+V}{r_0\sqrt{G_{hh}}} \int_s^0 \left( \frac{\partial r}{\partial h} + \frac{\partial r}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial h} \right) ds' \end{aligned} \quad \text{Eq. 53}$$

Onde:

- $r$  : densidade da água

O parâmetro de Coriolis ( $f$ ) depende da latitude e da velocidade angular da Terra ( $\Omega$ ), sendo definido por:

$$f = 2\Omega \sin f \quad \text{Eq. 54}$$

Onde:

- $\Omega$ : Velocidade de rotação da Terra

As parcelas  $F_x$  e  $F_h$  nas equações do momentum representam as tensões de cisalhamento horizontais de Reynolds. Estes tensores são modelados utilizando-se o conceito de viscosidade turbulenta, que os define como o produto entre o fluxo, o coeficiente de viscosidade turbulenta dependente da grade e seus correspondentes componentes do tensor médio da taxa de deformação. Para simulações de maior escala com grades de menor resolução, as expressões para os tensores de cisalhamento horizontais de Reynolds são simplificadas, sendo definidas por:

$$\begin{aligned} F_x &= u_H \left( \frac{1}{G_{xx}} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{G_{hh}} \frac{\partial^2 u}{\partial h^2} \right) \\ F_h &= u_H \left( \frac{1}{G_{xx}} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{G_{hh}} \frac{\partial^2 v}{\partial h^2} \right) \end{aligned} \quad \text{Eq. 55}$$

Onde:

- $u_H$ : coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal

A equação de transporte para constituintes conservativos (salinidade, temperatura e substâncias dissolvidas) em coordenadas  $\sigma$  é definida no Delft3D-FLOW por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(d+V)}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{hh}}(d+V)uc]}{\partial x} + \frac{\partial[\sqrt{G_{xx}}(d+V)vc]}{\partial h} \right\} + \frac{\partial wc}{\partial s} = \\ \frac{d+V}{\sqrt{G_{xx}}\sqrt{G_{hh}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{D_H}{s_{c0}} \frac{\sqrt{G_{hh}}}{\sqrt{G_{xx}}} \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial h} \left[ \frac{D_H}{s_{c0}} \frac{\sqrt{G_{xx}}}{\sqrt{G_{hh}}} \frac{\partial c}{\partial h} \right] \right\} + \\ + \frac{1}{d+z} \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{u_{mol}}{s_{mol}} + \max \left( \frac{u_{3D}}{s_c}, D_V^{back} \right) - I_d(d+z)c + S \right] \end{aligned} \quad \text{Eq. 56}$$

Onde:

- $c$ : concentração do constituinte
- $D_H$ : coeficiente de difusividade turbulenta horizontal
- $s_c$ : Número de Prandtl-Schmidt
- $s_{c0}$ : número de Prandtl-Schmidt para o constituinte (0.7)



- $S_{mol}$  : Número de Prandtl-Schmidt para mistura molecular (700 para sal e 6.7 para calor)
- $u_{mol}$  : componente cinemático de viscosidade turbulenta (molecular)
- $u_{3D}$  : componente da viscosidade turbulenta decorrente de turbulência tridimensional
- $D_V^{back}$  : coeficiente de difusividade turbulenta vertical
- $I_d$  : processo de decaimento de primeira ordem
- S: fontes e sorvedouros do constituinte por unidade de área

## APÊNDICE B – TENSÃO DE CISALHAMENTO DE FUNDO PARA MODELOS TRIDIMENSIONAIS

Para modelos tridimensionais o perfil logarítmico de velocidade pode ser descrito por:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad \text{Eq. 57}$$

Onde:

- $k$ : constante de Von Karman (0.4)
- $z$ : coordenada cartesiana vertical
- $z_0$ : espessura da camada subviscosa de fundo (nível onde velocidade = zero)

Na altura  $z=z_0$ , acima do leito de fundo a velocidade é zero.

A média da velocidade horizontal ao longo da coluna de água:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \left[ -1 + \ln \left( \frac{H}{z_0} \right) \right] \quad \text{Eq. 58}$$

Tal que:

$$u_* = \sqrt{g} \frac{\bar{u}}{C_{2D}} \quad \text{Eq. 59}$$

Combinando as duas últimas obtém-se  $z_0$ :

$$z_0 = H \exp \left( - \left( 1 + \frac{k}{\sqrt{g}} C_{2D} \right) \right) \quad \text{Eq. 60}$$

Assumindo uniformidade nas tensões exercidas no fundo para simulações bidimensionais e tridimensionais, a tensão de cisalhamento de fundo e o coeficiente de Chèzy para fluxos tridimensionais podem ser representados por:

$$t_{fluxo} = \frac{rg}{C_{3D}^2} |u_b|^2$$

$$C_{3D} = C_{2D} + \frac{\sqrt{g}}{k} \left[ 1 + \ln \left( \frac{0.5 \Delta z_b}{H} \right) \right]$$

**Eq. 61**

Onde:

- $C_{3D}$ : Coeficiente de Chèzy tridimensional
- $u_b$ : velocidade na camada subviscosa de fundo
- $\Delta z_b$ : espessura da camada de sedimento de fundo

Para fluxos hidrodinâmicos em fundos rugosos, a rugosidade de Nikuradse pode ser relacionada à espessura da camada subviscosa de fundo ( $z_0$ ) pela relação:

$$k_s = 30z_0$$

**Eq. 62**

A rugosidade de Nikuradse pode ser relacionada com o tamanho do sedimento pela relação:

$$k_s = 2.5d_{50}$$

**Eq. 63**

Onde:

- $d_{50}$ : Diâmetro médio das partículas do sedimento

## APÊNDICE C – TENSÃO DE CISALHAMENTO DE FUNDO DECORRENTE DE ONDAS DE SUPERFÍCIE

A magnitude das ondas de superfície geradas pelo vento depende das condições do vento, tempo de duração, batimetria e fricção de fundo. Os campos de onda são geralmente descritos pela altura significativa de onda, período significativo de onda e comprimento de onda significativo.

Alguns parâmetros de onda relevantes são tornados adimensionais relacionados à velocidade do vento a 10 metros de altura ( $U_{10}$ ):

a) Profundidade total da coluna de água (H):

$$H_* = \frac{gH}{U_{10}^2} \quad \text{Eq. 64}$$

b) Pista ou fetch (F):

$$F_* = \frac{gF}{U_{10}^2} \quad \text{Eq. 65}$$

c) Altura de onda (h):

$$h_* = \frac{gh}{U_{10}^2} \quad \text{Eq. 66}$$

d) Período de onda (T):

$$T_* = \frac{gT}{U_{10}} \quad \text{Eq. 67}$$

A altura significativa de onda e o período significativo de onda em função da profundidade e da pista do vento (ou fetch) para duração ilimitada de vento pode ser representada de acordo com Groen e Dorrestein (1976) por:

$$h_* = k_0 \tanh(k_3 H_*^{m3}) \tanh \left[ \frac{k_1 H_*^{m1}}{\tanh(k_3 H_*^{m3})} \right] \quad \text{Eq. 68}$$

$$T_* = m_0 \tanh(k_4 h_*^{m_4}) \tanh \left[ \frac{k_2 F_*^{m_2}}{\tanh(k_4 H_*^{m_4})} \right]$$

Onde os coeficientes  $k_n$  e  $m_n$  possuem os seguintes valores:

- $k_0=0.24$ ;  $k_1=0.015$ ;  $k_2=0.0345$ ;  $k_3=0.710$ ;  $k_4=0.855$
- $m_0=2\pi$ ;  $m_1=0.45$ ;  $m_2=0.037$ ;  $m_3=0.763$ ;  $m_4=0.365$

A altura de onda ( $h$ ) é limitada a  $0.55H$ , tornando fixa neste valor quando a altura de onda computada o excede. O período de onda ( $T$ ) também é limitado ao valor obtido quando a altura de onda atinge  $0.55H$ . O comprimento de onda ( $L$ ) provém da teoria linear de onda, sendo obtido de forma implícita resolvida iterativamente:

$$T = \sqrt{\frac{2p}{g} L \coth \left( \frac{2pH}{L} \right)} \quad \text{Eq. 69}$$

As ondas induzem um movimento vertical circular (velocidade orbital) que decresce com a profundidade. A magnitude da velocidade orbital de onda ( $U_{orb}$ ) na camada de água sobrejacente ao fundo provém da teoria de onda linear, representada por:

$$U_{orb} = \frac{ph}{T \sinh(2pH / L)} \quad \text{Eq. 70}$$

Durante a propagação, as ondas exercem forças de fricção no fundo. A magnitude da tensão de cisalhamento de fundo integrada no tempo induzida pelas ondas pode ser representada por (Van Rijn, 1993):

$$t_w = \frac{1}{4} r f_w U_{orb}^2 \quad \text{Eq. 71}$$

Onde  $f_w$  é o fator de fricção de onda, obtido a partir das possíveis formulações de Tamminga (1987), de Swart (1974) ou de Soulsby (1997), representadas em seqüência:

$$f_w = 0.16 \sqrt{\frac{2pk_s}{U_{orb} T}} \quad \text{Eq. 72}$$

$$f_w = 0.00251 \exp(5.21r^{-0.19}) \quad \text{para } r > 1.57 \quad \text{Eq. 73}$$

$$f_w = 0.3 \quad \text{para } r \leq 1.57$$

$$f_w = 0.237r^{-0.52} \quad \text{Eq. 74}$$

$$\text{tal que: } r = \frac{A}{k_s} \quad \text{Eq. 75}$$

Onde:

- $r$ : comprimento relativo de rugosidade

- $A$ : Excursão semi-orbita:  $A = U_{orb}T / 2p$

- $K_s$ : Rugosidade de Nikuradse

## ANEXO A – TABELAS DE CONSTITUINTES ASTRONÔMICAS

**Tabela 13 – Constituintes astronômicas do contorno aberto esquerdo.**

	<b>1A</b>		<b>1B</b>	
<b>Constituinte</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Fase</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Fase</b>
MS4	0.03	48.56	0.03	46.17
M4	0.07	-27.15	0.06	-29.69
MN4	0.03	-55.14	0.03	-57.29
M3	0.08	-15.80	0.07	-15.62
K2	0.08	165.98	0.08	166.68
S2	0.24	170.54	0.23	171.25
M2	0.34	167.39	0.33	168.19
N2	0.06	224.39	0.06	225.13
K1	0.07	179.92	0.07	180.79
P1	0.02	185.70	0.02	186.51
O1	0.11	118.84	0.11	118.74
Q1	0.03	99.03	0.03	98.83

**Tabela 14 – Constituintes astronômicas do contorno aberto central.**

	<b>2A</b>		<b>2B</b>	
<b>Constituinte</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Fase</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Fase</b>
MS4	0.03	46.17	0.03	55.40
M4	0.06	-29.69	0.06	-20.21
MN4	0.03	-57.29	0.03	-48.14
M3	0.07	-15.62	0.07	-4.30
K2	0.08	166.68	0.08	172.26
S2	0.23	171.25	0.23	176.75
M2	0.33	168.19	0.34	172.76
N2	0.06	225.13	0.06	229.65
K1	0.07	180.79	0.08	181.01
P1	0.02	186.51	0.03	186.76
O1	0.11	118.74	0.11	119.44
Q1	0.03	98.83	0.03	98.84

**Tabela 15 – Constituintes astronômicas do contorno aberto direito.**

	<b>3A</b>		<b>3B</b>	
<b>Constituinte</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Fase</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Fase</b>
MS4	0.03	56.70	0.03	55.40
M4	0.07	-18.05	0.06	-20.21
MN4	0.03	-45.80	0.03	-48.14
M3	0.08	-3.05	0.07	-4.30
K2	0.08	172.56	0.08	172.26
S2	0.24	177.05	0.23	176.75
M2	0.35	172.97	0.34	172.76
N2	0.06	229.89	0.06	229.65
K1	0.08	179.70	0.08	181.01
P1	0.03	185.60	0.03	186.76
O1	0.11	119.85	0.11	119.44
Q1	0.03	99.46	0.03	98.84